



ESCOLA NAVAL

ta tante de bi-faire



José Pedro Pereira Leite

Estado da Arte e Análise Comparativa de Sistemas de Propulsão de Emissões RED

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval - Ramo de Mecânica



Alfite

2020



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



José Pedro Pereira Leite

Estado da Arte e Análise Comparativa de Sistemas de Propulsão de Emissões RED

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica

Orientação de: Contra-Almirante ECN (RES) Francisco de Figueiredo e Silva Cunha Salvado

O Aluno Mestrando

O Orientador

Alfeite

2020

“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.”

Fernando Pessoa, revista “Presença” (1933)

Agradecimentos

Quero agradecer ao meu orientador Contra-Almirante ECN (RES) Francisco de Figueiredo e Silva Cunha Salvado por todo o apoio, motivação, supervisão, tempo e paciência disponibilizada.

À minha família que sempre me apoiou e nunca me deixou desanimar, mesmo nos momentos de maior dificuldade e, nunca esquecer que a família é onde a nossa história começa.

A todas as amigas que sempre levarei no peito e que levarei para qualquer canto do mundo, sabendo sempre que os conselhos de cada um deles era pelo melhor. Independentemente do lugar onde estaremos a amizade conecta as pessoas através do coração, não importa quão distante elas estejam uma da outra.

Resumo

A entidade responsável pela segurança e o bom comportamento ambiental dos navios é *International Maritime Organization* (IMO). A IMO tem vindo a regulamentar as emissões de SO_x, NO_x, PM e CO₂.

Os navios devem cumprir a regulamentação estabelecida pela IMO referente às zonas ECA, e isso só poderá ser feito se as entidades conseguirem arranjar soluções de forma a atingir os objetivos estabelecidos. Tentar mudar o tipo de combustível utilizado de modo a diminuir as emissões poluentes sem que seja necessário mudar o sistema de propulsão, promover a instalação de equipamentos que reduzam os poluentes provenientes dos gases de evacuação, ou converter todo o sistema de propulsão para uma tecnologia que seja mais “amiga” do ambiente, são algumas das opções disponíveis.

Na presente Dissertação de Mestrado é exposto o modo de funcionamento de vários sistemas e tecnologias que são capazes de atuar em conformidade com a legislação definida pela IMO. Vários exemplos de navios com fins militares são enumerados que têm como instalação sistemas de propulsão e tecnologia capazes de melhorar o desempenho dos sistemas de propulsão convencionais em termos ambientais e é também referido o estado da arte de equipamentos e sistemas de propulsão.

O estudo energético é realizado nos sistemas de propulsão mais viáveis para a instalação num navio da Marinha de Guerra Portuguesa, que ao usarem diferentes combustíveis terão diferentes consumos e autonomias.

Sendo, como conclusão, a necessidade de análise de alguns sistemas e tecnologias de redução de emissões bastante importantes para uma futura instalação num navio de guerra.

Palavras chave: IMO, zonas ECA, combustível, sistemas de propulsão.

Abstract

The responsible entity for the security and good environmental behaviour in ships is the *International Maritime Organization* (IMO). IMO has been regulating SO_x, NO_x, PM and CO₂ emissions.

Ships must comply the regulations established by the IMO regarding ECA zones. This can only be done if the entities are able to find alternatives to achieve the established results, as attempting in any way to change the type of fuel used in order to reduce polluting emissions without having to change the propulsion system, installing equipment that reduces pollutants from exhaust gases or convert the entire propulsion system to a technology that is more “environmentally friendly”.

In this dissertation it is exposed how several systems and technologies that can perform in accordance with IMO legislations, works. Several examples of military ships that have propulsion systems and technology capable of improving the behaviour of conventional propulsion system in environmental terms, are listed as well as the state of art of equipment and propulsion systems.

An energetic study is carried out on the most viable propulsion systems for installation on a Portuguese Navy ship, which when using different fuels will have different consumption and autonomy.

As a conclusion, the need to analysis some emission reduction systems and technologies is very important for a future installation on a warship.

Keywords: IMO, ECA zones, fuel, propulsion systems.

Índice Geral

Agradecimentos.....	VII
Resumo	IX
Abstract.....	XI
Índice de Figuras.....	XVI
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....	XXI
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Justificação do Tema	2
1.3. Números da Poluição Marítima e Transformações Climáticas	3
1.4. Legislações Estabelecidas	6
2. Regulamentação Internacional.....	10
2.1. IMO.....	10
2.2. Corpo Regulatório Inicial	13
2.2.1. A Conferência de Genebra de 1948.....	13
2.3. Convenção MARPOL	15
2.3.1. Regras Gerais para os Diferentes Tipos de Poluição	16
2.3.2. Anexo VI da Convenção MARPOL	18
2.4. Implementação dos Objetivos e Medidas Preconizadas.....	20
3. Estado da Arte	24
3.1. Medidas Tomadas	24
3.2. Alternativas Definidas	27
3.2.1. Navios de LNG.....	27
3.2.1.1. Turbina a Vapor.....	28
3.2.1.2. Turbina a Gás.....	30
3.2.1.3. Motores de combustão interna.....	34
3.2.2. Navios a <i>Dual-Fuel</i> (DF).....	44
3.2.3. Navios <i>Diesel-Electric</i>.....	47

3.2.4.	Navios de Propulsão Elétrica.....	50
3.2.5.	Navios com Sistemas de Propulsão a Hidrogénio	55
3.2.6.	Tecnologias para Diminuir as Emissões.....	59
3.2.6.1.	Sistema <i>Scrubber</i>	59
3.2.6.2.	<i>Selective Non-Catalytic Reduction</i> (SNCR)	65
3.2.6.3.	<i>Selective Catalytic Reduction</i> (SCR)	66
3.2.6.4.	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> (EGR).....	68
3.2.6.5.	Combustíveis com baixo teor de enxofre	69
4.	Análise Comparativa	71
4.1.	Benefícios e Desafios de cada Alternativa.....	72
4.1.1.	Navios LNG.....	72
4.1.2.	Navios a <i>Dual-Fuel</i>	74
4.1.3.	Navios <i>Diesel-Electric</i>	77
4.1.4.	Navios de Propulsão Elétrica.....	81
4.1.5.	Navios com Sistemas de Propulsão a Hidrogénio	83
4.1.6.	Tecnologias para Diminuir as Emissões.....	85
4.1.6.1.	Sistema <i>Scrubber</i>	85
4.1.6.2.	<i>Selective Non-Catalytic Reduction</i> (SNCR)	87
4.1.6.3.	<i>Selective Catalytic Reduction</i> (SCR)	88
4.1.6.4.	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> (EGR).....	89
4.1.6.5.	Combustíveis com baixo teor de enxofre	91
5.	Aplicabilidade a navios de guerra	94
5.1.	Adversidades	96
5.2.	Tipos de Navios e Moldes Operacionais	97
6.	Estudo de Implementação.....	104
6.1.	Discussão de Viabilidade de Sistemas.....	105
6.2.	Análise Dimensional	119
7.	Conclusão	124
	Bibliografia.....	126

Índice de Figuras

Figura 1- SECA's Mar do Norte e Mar Báltico(CROE Marine Exhaust Scrubbers for MARPOL Compliance, n.d.).....	2
Figura 2-Distribuição geográfica das emissões marítimas, com base na combinação de dados AMVER ² e COADS ³ (Dalsøren et al., 2009).....	5
Figura 3-Contribuição média anual (%) de todos os navios e portos para NOx (esquerdo) e SOx (direito)(Dalsøren et al., 2009).....	6
Figura 4-Contribuição média anual (%) de todos os navios e portos para a formação de Ozono Troposférico(Dalsøren et al., 2009).....	6
Figura 5- Regulamentos da IMO sobre o teor de enxofre nos combustíveis navais(Chu Van et al., 2019).....	7
Figura 6-O navio Torrey Canyon (esquerda) e área abrangida pelo derrame (direita)(Torrey Canyon: The world's first major oil tanker disaster - SAFETY4SEA, n.d.)(PERSONAL PROFILE Colin de la Rue, n.d.).....	11
Figura 7- Mapa das atuais zonas ECA(López, 2015)	24
Figura 8- Regulamentos da IMO sobre emissões de NOx (IMO, 1999)(Chu Van et al., 2019)	26
Figura 9-Configuração de um sistema básico de propulsão através de turbina a vapor(Gómez & Baaliña, 2017).....	29
Figura 10- DFGE (Dual-Fuel Gas Turbine Electric Propulsion)(Gómez & Baaliña, 2017)	30
Figura 11-Esquema de um ciclo combinado ativado por energia(Gómez & Baaliña, 2017)	31
Figura 12- Sistema COGES desenhado pela Rolls-Royce(Gómez & Baaliña, 2017)....	32
Figura 13-Sistema COGES desenhado pela General Electric(Gómez & Baaliña, 2017)	33
Figura 14- Configuração de um sistema de propulsão de motores diesel a 2 tempos com um esquema de retorno de liquefação	35
Figura 15-Esquema básico do sistema de retorno de liquefação	36
Figura 16- Sistema de propulsão com um motor principal a 2 tempos com sistema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017).....	37
Figura 17- Sistema de propulsão com dois motores principais 2S e com sistema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017).....	37

Figura 18-Configuração do sistema de propulsão Diesel-Elétrico utilizando motores DF a 4 tempos(Gómez & Baaliña, 2017).....	38
Figura 19-Configurações de sistema de propulsão Diesel-Electric utilizando motores Dual-Fuel a 4 tempos(Gómez & Baaliña, 2017)	39
Figura 20- Relação entre a velocidade do navio e a quantidade de BOG que foi liquefeito pelo sistema(Gómez & Baaliña, 2017)	40
Figura 21-Gestão de gás em motores a 2 tempos de DF(Gómez & Baaliña, 2017).....	41
Figura 22-Esquema de motores a 2 tempos a DF(Gómez & Baaliña, 2017)	41
Figura 23-Válvula injetora de gás(Gómez & Baaliña, 2017).....	42
Figura 24-Componentes do sistema de injeção de gás num cilindro de motor DF a 2 tempos de baixa pressão(Gómez & Baaliña, 2017).....	43
Figura 25-Sistema de fornecimento de gás de motores a 2 tempos de DF de baixa pressão(Gómez & Baaliña, 2017).....	43
Figura 26-Configuração do sistema de propulsão de motores DF de baixa pressão a 2 tempos(Gómez & Baaliña, 2017)	44
Figura 27-Secções do sistema de injeção nos motores Dual-Fuel(Sentís, 2012)	45
Figura 28-Secção do Injetor(Sentís, 2012).....	46
Figura 29-Esquema do Injetor(Sentís, 2012)	46
Figura 30-Sistema típico de propulsão Diesel-Electric(Geertsma et al., 2017)	47
Figura 31- USS ARLEIGH BURKE (DDG 51)(Pages - default, n.d.).....	48
Figura 32-Classe de navios da Marinha Italiana, Bergamini FREMM(Naval Analyses: Bergamini class (FREMM) frigates of the Italian Navy, n.d.).....	49
Figura 33- HNLMS Roterdão com propulsão elétrica (29)	50
Figura 34-Sistema típico de propulsão elétrica(Geertsma et al., 2017)	51
Figura 35- Resultados do estudo de emissões de NOx	52
Figura 36- Esquema de propulsão elétrica com barramentos de fase separada	52
Figura 37-Porta-Aviões Queen Elizabeth(British aircraft carrier Queen Elizabeth aborts sea trial after ‘major leak’, report says South China Morning Post, n.d.)	53
Figura 38-Princípio Funcional de uma Fuel Cell(Siemens AG, 2009).....	57
Figura 39-NRP Tridente(Submarino Tridente em reparação no Alfeite Cibersul, n.d.)	58
Figura 40-a)Bateria de Fuel Cell com FCM 34, acoplamento direto da tensão à rede nos submarinos da classe 212A b)Bateria de Fuel Cell com FCM 120; acoplamento via conversor nos submarinos da classe 214(Siemens AG, 2009).....	58

Figura 41-Dry Scrubber com sistema de grãos(Sentís, 2012).....	60
Figura 42-Esquema de um Scrubber de Circuito Aberto(Sentís, 2012)	62
Figura 43-Esquema de um Scrubber de circuito fechado	63
Figura 44-Scrubber em circuito aberto(López, 2015).....	65
Figura 45-Scrubber em circuito fechado(López, 2015)	65
Figura 46-Esquema de um sistema SCR(López, 2015)	67
Figura 47-Esquema de um sistema EGR(López, 2015).....	68
Figura 48-Sistema EGR de segunda geração integrado no motor(Sentís, 2012)	69
Figura 49- Estima de Mercado do LNG(López, 2015).....	72
Figura 50- Preços dos combustíveis na Europa NW(LNG as a Shipping Fuel in Northern Europe Global Maritime Hub, n.d.)	73
Figura 51- Emissões específicas de NOX(Yang et al., 2013)	75
Figura 52-Emissões específicas de CO2(Yang et al., 2013).....	75
Figura 53-Curvas de funcionamento dos motores Diesel(Geertsma et al., 2017).....	77
Figura 54- Eficiência necessária dos Scrubbers SOX(MAN, n.d.-a)	85
Figura 55-Relação entre a pressão de retorno adicional e os parâmetros do motor(MAN, n.d.-a)	86
Figura 56-Motor Wärtsilä 34DF(Wärtsilä 34DF, n.d.).....	98
Figura 57-Navio da Guarda Costeira da Finlândia, Turva(Range, n.d.)	98
Figura 58-Sistema CODLAG da Rolls-Royce(Our stories - Hybrid propulsion for naval vessels –Rolls-Royce, n.d.)	99
Figura 59-Fragata Alemã da classe Baden Württemberg(Dienstantritt für die erste „F 125“ ab Mai - THB, n.d.)	100
Figura 60-DDG-1000 Zumwalt(Orçamento de defesa dos EUA poderá sofrer grandes cortes no orçamento nos próximos anos - Meta-Defense.fr, n.d.).....	101
Figura 61-Motor MAN VP185(MAN PrimeServ Academy, n.d.).....	102
Figura 62- Comparação do teor de energia entre gás natural, biogás e hidrogénio(Saito, 2018)	112
Figura 63-Dados recolhidos nas provas de mar do NPO	114
Figura 64-Gráfico Velocidade\Potência.....	114
Figura 65- Tabela de dados recolhidos conforme perfil operacional	115
Figura 66-Tabela de dados de funcionamento do motor, Wärtsilä 12V34DF (Guide, n.d.)	116
Figura 67-Diagrama do sistema Diesel-Electric(Diesel, n.d.).....	117

Figura 68- Tabela de várias dimensões de Scrubbers da Wärtsilä(Aflet, 2017)	119
Figura 69-Casa das Máquinas do NPO	119
Figura 70- Esquema do motor, Wärtsilä 12V34DF(Guide, n.d.)	120
Figura 71- Motor MAN 6L32/40(6L32/40 Engine Family, n.d.)	120
Figura 72- Motor MAN 8L21/31(Marine, n.d.)	121
Figura 73-Módulo de baterias da ABB(Containerized energy storage systems Complete battery storage systems for retrofit and newbuilt vessels, n.d.).....	121
Figura 74-Parte do sistema de evacuação do NPO	122

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AC - Alternate Current

AIP - Air-Independent Propulsion

AMVER - Automated Mutual-Assistance Vessel Rescue System

BOG – Boil Off Gas

C₂H₆ - Etano

C₃H₈ - Propano

C₄H₁₀ - Butano

C₅H₁₂ - Pentano

CE - Comissão Europeia

CH₄ - Metano

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

COADS - Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set

COGES - Combined Gas Turbine Electric & Steam System

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

CTM - Chemical Transport Model

DF - Dual Fuel

DFGE - Dual-Fuel Gas Turbine Electric Propulsion

DP-Dynamic Position

ECA - Emission Control Area

EMEP - Serviço Europeu de Monitorização e Programa de Avaliação

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

EUA - Estados Unidos da América

FIVA - Fuel Injection Valve Actuator

FPP - Fixed Pitch Propeller

FREMM - Frigate European Multi-Mission

GCU – Gas Combustion Unit

GMDSS - Sistema Global de Socorro e Segurança Marítima

GN - Gás Natural

H2 - Hidrogénio molecular

HC - Hidrocarbonetos

HFO - Heavy Fuel Oil

HNLMS - His/Her Netherland Majesty's Ship

IDT-Initiation Delay Time

IMO - International Maritime Organization

IMSO - International Mobile Satellite Organization

ISPS - Código Internacional de Segurança das Instalações Marítimas e Portuárias

K-Kelvin

kW - Kilowatt

LD-Low Duty

LSHFO - Low Sulphur Fuel Oil

MARPOL - Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição dos Navios

MCR - Maximum Continuous Rating

MDO - Marine Diesel Oil

MGO - Marine Gasoil

MW - Megawatt

N2 - Azoto molecular

NaOH - Hidróxido de Sódio

NECA - Nitrogen Emission Control Area

NO_x - Óxido de Azoto

NPO – Navio de Patrulha Oceânico

PCB's - Polychlorinated Biphenyl

pH - Potencial de Hidrogénio

PM - Material Particular

PTI - Pre-Trial Intervention

PTO - Power Take Off

RED - Renewable Energy Directive

SECA - Sulphur Emission Control Area

SFC - Specific Fuel Consumption

SFOC - Specific Fuel Oil Consumption

SNCR - Selective Non-Catalytic Reduction

SOLAS - Convenção Internacional para a Segurança da Vida no Mar

SO_x - Óxido de Enxofre

STCW - Convenção Internacional sobre Normas de Formação, de Certificação e de Serviços de Quartos para os Marítimos

SUA - Convenção para a Supressão de Atos Ilícitos Contra a Segurança da Navegação Marítima

ton - Toneladas

UE – União Europeia

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Embora não sejam novas, as preocupações ambientais, ganharam um enorme relevo nos tempos mais recentes, devido aos alertas que se vêm intensificando da comunidade científica e à pressão da opinião pública, cada vez mais preocupada perante a proliferação de fenómenos climáticos extremos. Um dos aspetos que vêm constituindo um dos focos da atenção das entidades reguladoras, governos e organizações supranacionais, é o das emissões de produtos poluentes libertados para o ambiente com origem na atividade humana, nomeadamente nos, transportes e em particular, no transporte marítimo, em que as instalações propulsoras dos navios contribuem de forma significativa.

A poluição atmosférica que está associada à navegação marítima internacional causa anualmente, aproximadamente, 50 mil mortes, só e na Europa, o que acarreta um custo anual para a sociedade de mais de 58 mil milhões de euros, de acordo com estudos científicos recentes. Os motores marítimos são responsáveis pela emissão, para além do carbono negro, de partículas secundárias que expelidos para a atmosfera, são convertidos, através de reações químicas no ar atmosférico, em pequenas partículas, aerossóis de sulfatos e nitratos. Estas partículas são nocivas para a saúde e constituem um dos maiores impactos causados pela poluição proveniente do transporte marítimo. A Organização Marítima Internacional (IMO - International Maritime Organization), de que se falará adiante, tem abordado estes temas, tendo criado um instrumento regulatório, a convenção MARPOL, onde são definidos critérios, requisitos e regras que abarcam as diversas áreas relacionadas com a poluição do mar. Em particular o Anexo VI da Convenção MARPOL, trata da poluição por emissões de partículas poluentes, identificando-se como as mais nocivas e relevantes, os óxidos de azoto (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e Material Particles (PM) (Partículas Materiais) libertados pelos motores marítimos. (Seddiek & Elgohary, 2014)

A Organização Marítima Internacional tem vindo a definir medidas de mitigação da poluição atmosférica proveniente de motores marítimos e uma das suas medidas mais recentes consistiu na adoção, em outubro de 2016, de um limiar de 0,5% de enxofre contido no combustível marítimo, medida essa que entrará em vigor em 2020. Entretanto, continuando os navios a ser uma importante fonte de poluição atmosférica tóxica as

nações têm vindo a definir áreas, onde o elevado tráfego marítimo, as torna particularmente afetadas por essas emissões prejudiciais, áreas essas, sujeitas a um controlo e fiscalização apertadas das emissões poluentes. Graças à criação de Áreas de Controlo de Emissões de Enxofre (SECA – Sulphur Emission Control Areas) no Mar do Norte e no Mar Báltico, a qualidade do ar melhorou significativamente nesta área.(Ammar & Seddiek, 2018)

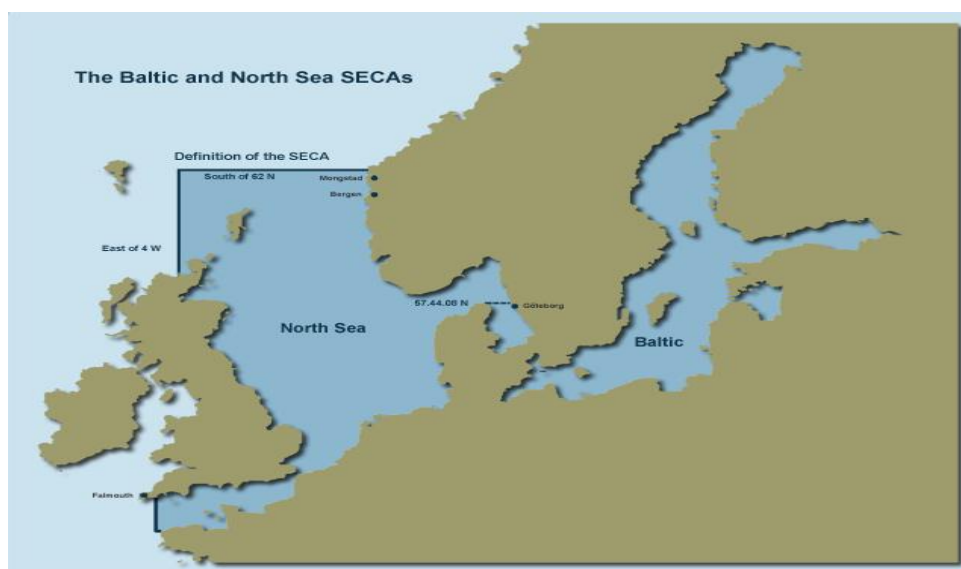


Figura 1- SECA's Mar do Norte e Mar Báltico(CROE Marine Exhaust Scrubbers for MARPOL Compliance, n.d.)

A indústria naval, os portos e cidades costeiras, estão, simultaneamente, confrontados com o desafio de encontrar estabelecer as soluções técnicas e legislativas para implementar as medidas que permitam cumprir os limites de emissões impostos pelos estados de bandeira signatários da conferência MARPOL da IMO, de modo a que se consiga reduzir eficazmente a poluição atmosférica que deriva do tráfego marítimo.(Ammar & Seddiek, 2018)

1.2. Justificação do Tema

A diminuição das emissões de poluentes provenientes, essencialmente dos motores de combustão internas maioritariamente empregues na propulsão dos navios, conforme a regulamentação emanada pela IMO, requer políticas e soluções tecnológicas adequadas, que permitam reduzir tais emissões sem colocar em causa o comércio marítimo, essencial ao bem-estar global das sociedades. Paralelamente, as Marinhas não devem alhear-se deste esforço, embora aos navios de guerra não sejam aplicáveis, com carácter de obrigatoriedade, as disposições das convenções da IMO. Contudo algumas

disposições têm sido estendidas aos navios de guerra pelos diversos Estados, numa tendência cada vez mais generalizada. A instalação de sistemas de redução de emissões em meios navais, para além do benefício associado a uma diminuição do impacto ambiental, evitará futuros constrangimentos relacionados com eventuais restrições no acesso de navios de guerra a portos e áreas abrangidas por regulamentações mais apertadas e também os constrangimentos internos decorrentes da eventual desaprovação, pela opinião pública nacional, da não conformidade com a legislação aplicável aos navios de comércio.

A identificação dos métodos e sistemas possíveis para realizar o processo de diminuição de emissões por parte dos navios, constitui, pois, a motivação deste trabalho. Foram identificadas como técnicas possíveis para atingir este objetivo a utilização de equipamentos que associados aos sistemas propulsores, permitem a redução de emissões, a utilização de combustíveis alternativos e a conceção de estratégias económicas ao nível dos combustíveis. Estes são alguns dos métodos usados para combater a poluição causada.

O estudo destes métodos irá contribuir para a avaliação de soluções futuras para a implementação na Marinha, de sistemas mais amigos do ambiente, no âmbito das orientações políticas para a transição energética.

1.3. Números da Poluição Marítima e Transformações Climáticas

Embora as emissões nocivas por parte de fontes terrestres se tenham reduzido gradualmente, o aumento contínuo do tráfego marítimo, que atualmente representa mais de 90% do comércio mundial total, levou a uma maior contribuição para a poluição global. Como resultado foi necessário haver uma consciencialização de forma a combater o impacto ambiental negativo dos navios, o que forçou a indústria naval a reduzir consideravelmente as emissões com o objetivo de preservar o mar, o meio ambiente em geral e a saúde de todos os seres vivos. Apesar da maioria das emissões nocivas provenientes dos gases de evacuação dos navios durante as suas deslocações acabem por ser distribuídas por todas as extensões marítimas, várias pesquisas realizadas por organizações ambientais não-governamentais mostraram que os navios são dos maiores causadores, tomando como exemplo, as causas de chuvas ácidas. Além disso, devido à densidade do tráfego marítimo, os navios contribuem significativamente para o nível elevado de partículas perigosas para a saúde e para a destruição da camada de Ozono.

Estima-se que as emissões anuais dos navios de comércio que circulam nas zonas marítimas Europeias contenham 3,3 milhões de toneladas de Óxidos de Azoto (NO_x), 2,3 milhões de toneladas de Óxidos de enxofre (SO_x) e 250.000 toneladas de Material Particular nocivo (PM). Prevê-se que as emissões de SO_x e NO_x aumentem cerca de 40-50% entre os anos 2000 e 2020. Na confirmação destas previsões, as emissões Europeias por navios envolvidos no transporte internacional, atingirão ou poderão mesmo vir a exceder o total de emissões poluentes das fontes terrestres em todos os 27 Estados membros da UE até 2020. Contudo, de acordo com aferições mais recentes do Serviço Europeu de Monitorização e Programa de Avaliação (EMEP), a redução anual de NO_x na área do Mar Báltico será de 22.000 toneladas como resultado das medidas designadas recentemente pela IMO nas Áreas de Controlo de Emissões de NO_x do Báltico e do Mar do Norte.(Seddiek & Elgohary, 2014)(Ammar & Seddiek, 2018)

Estudos revelam que o transporte internacional representa 14-31%, 4-10% e 2-3% das emissões totais a nível mundial de NO_x, SO_x e CO₂, respetivamente. Um estudo das emissões dos gases de efeito de estufa por parte da IMO prevê que, apesar de um aumento previsto na eficiência média dos navios de 40% e, na ausência de outras regulamentações, as emissões de CO₂ causadas pelos transportes marítimos poderia aumentar entre 50-250% até 2050. Estes números dependem do crescimento económico futuro e do desenvolvimento energético. As medidas aplicadas a bordo dos navios para reduzir as emissões de gases de evacuação e o consumo de combustível terão, contudo, um bom efeito do ponto de vista ambiental e económico. A importância económica das opções relativas ao combustível utilizado nos navios irá aumentar, especialmente com o rápido aumento dos preços do mesmo.(Seddiek & Elgohary, 2014)(Ammar & Seddiek, 2018)

Uma das formas de se quantificarem as emissões libertadas foi a realização de um modelo global de transporte químico (CTM¹), que é usado para calcular os impactos ambientais das emissões. Considera-se que as emissões dos navios são o grande contribuinte ao longo dos oceanos, de concentrações superficiais de NO_x e SO_x, não descurando que também o são nas zonas costeiras. Relativamente ao Ozono Troposférico, a contribuição para a sua formação é elevada nos oceanos localizados principalmente na América do Norte Ocidental (contribuição 15–25%) e na Europa Ocidental (5–15%), sendo que o Ozono Troposférico é extremamente prejudicial para a saúde humana. No

¹ CTM (Chemical Transport Model) é um modelo numérico computadorizado que simula a quantidade de emissões químicas poluentes libertadas na atmosfera.

que diz respeito à formação de chuvas ácidas, descobriu-se que os navios contribuem com 11% para a concentração de Nitratos e 4,5% de Enxofre na atmosfera global, em certas regiões costeiras, as contribuições podem variar 15-50%.(Dalsøren et al., 2009)

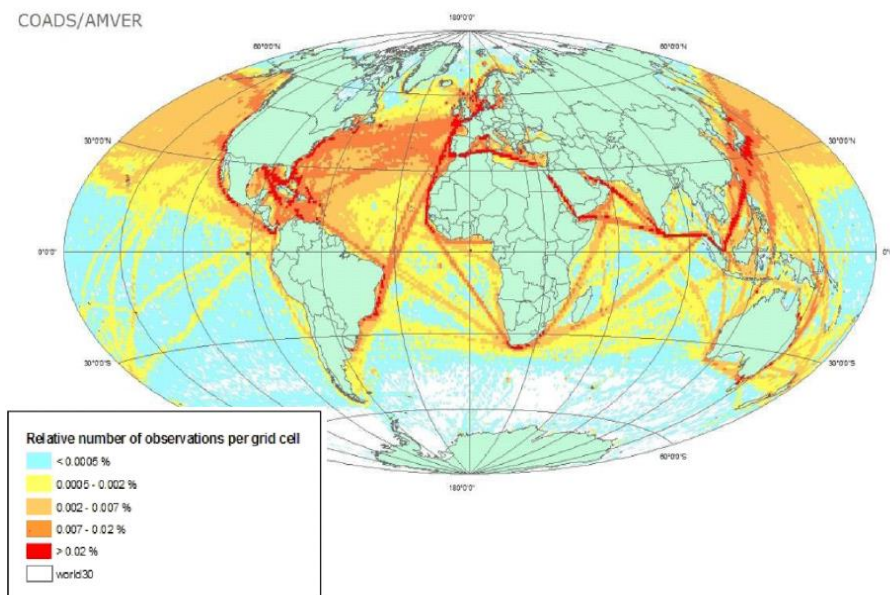


Figura 2-Distribuição geográfica das emissões marítimas, com base na combinação de dados AMVER² e COADS³(Dalsøren et al., 2009)

O contributo mais significativo para a formação de chuvas ácidas e Ozono Troposférico das emissões dos navios, verifica-se nas zonas da América do Norte, Escandinávia, Europa Ocidental, Oeste do Norte de África, Médio Oriente, Leste Asiático e Malásia/Indonésia. Para a maioria dessas regiões o tráfego marítimo tem maior impacto que as emissões de fontes terrestres, como se pode ver na Figura 2. Como já referido anteriormente, as emissões de NO_x e SO_x têm grandes impactos nas zonas portuárias como se pode ver na Figura 3 e na formação de Ozono Troposférico representado na Figura 4.(Dalsøren et al., 2009)

² AMVER (Automated Mutual-Assistance Vessel Rescue System) é um sistema mundial de relatórios cedidos pela Guarda Costeira dos Estados Unidos.

³ COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) é um sistema de organização de dados que fornece um registo do comportamento da atmosfera oceânica.

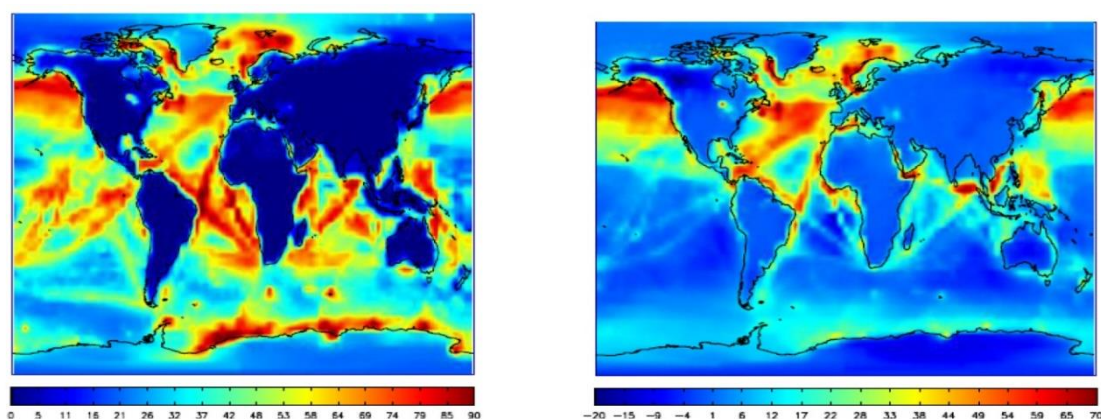


Figura 3-Contribuição média anual (%) de todos os navios e portos para NOx (esquerdo) e SOx (direito)(Dalsøren et al., 2009)

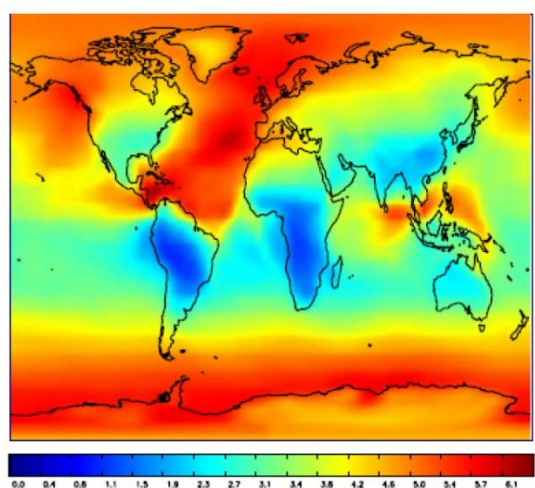


Figura 4-Contribuição média anual (%) de todos os navios e portos para a formação de Ozono Troposférico(Dalsøren et al., 2009)

1.4. Legislações Estabelecidas

Além dos regulamentos emitidos pela IMO que serão apresentados no capítulo seguinte, outros países e jurisdições, nomeadamente o Estado da Califórnia, têm vindo a introduzir, também limites ao teor de enxofre no combustível e a propor regulamentos de emissão dos navios. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA dos EUA) e a União Europeia (UE) têm legislado com o fim de reduzir ainda mais os impactos ambientais negativos das emissões. Como pode ser visto na Figura 5, a partir da data de 1 de janeiro de 2010, a diretiva europeia 2005/33/CE exigiu que todos os navios atracados em portos europeus usassem combustível com um teor de enxofre inferior a 0,1%. (Chu Van et al., 2019)(Europeu et al., 2006)

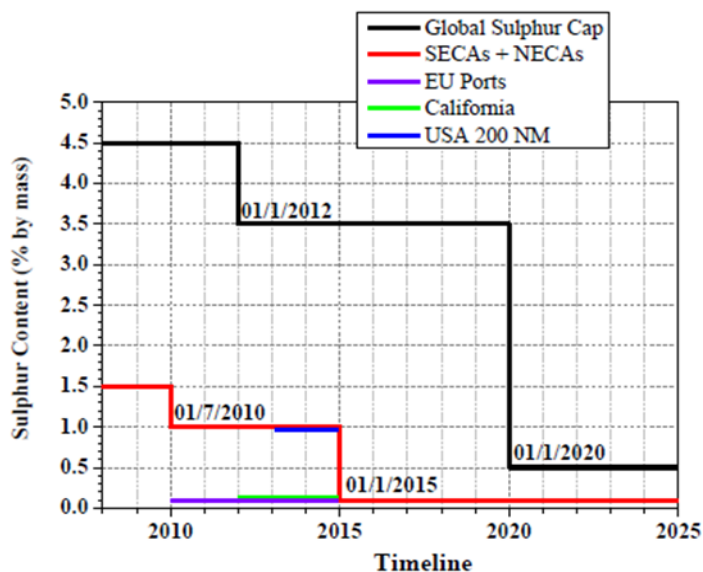


Figura 5- Regulamentos da IMO sobre o teor de enxofre nos combustíveis navais(Chu Van et al., 2019)

À semelhança do anexo VI da Convenção MARPOL revisto, da Diretiva 2012/33/UE estabeleceu-se igualmente a utilização de combustíveis com um teor máximo de enxofre de 0,50 % em todas as outras águas sob jurisdição de um Estado-Membro da UE fora das ECA, a partir de 1 de janeiro de 2020. Contrariamente ao disposto no anexo VI da Convenção MARPOL revisto, a entrada em vigor deste requisito na UE, em 2020, não foi sujeita a uma posterior revisão em função das disponibilidades de combustíveis conformes, assegurando, deste modo, a segurança jurídica desde o início e deixando à indústria tempo suficiente para se preparar.(Comissão das Comunidades Europeias, 2018)

No entanto, os navios de passageiros que circulem nos espaços marítimos Europeus que não sejam abrangidos por nenhuma ECA podem utilizar combustíveis marítimos com um teor de Enxofre de 1,5% de 1 de janeiro de 2015 a 1 de janeiro de 2020. Uma das medidas estabelecidas pelo Estado da Califórnia refere-se à utilização de combustíveis marítimos mais limpos pelos navios que operem nas suas zonas costeiras. Em particular, o enxofre contido no combustível e outros requisitos operacionais para navios que façam as suas deslocações dentro das águas da Califórnia e a 24 milhas náuticas da linha de base da Califórnia, foi adotada em 24 de julho de 2008, e está em vigor desde julho de 2009. Além disso alguns tipos de navios, tais como navios porta-contentores, navios de passageiros e as frotas de navios de carga-refrigerada que visitam portos californianos precisam cumprir esses regulamentos de forma a atingir os objetivos de redução de emissões de 80% até 2020.(Chu Van et al., 2019)

Os regulamentos da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) relativos a sistemas marítimos, identificam três categorias de motores. Os motores diesel que pertencem às categorias 1 e 2, têm normalmente potências de 500-8000 kW. Motores pertencentes a estas categorias podem ser utilizados como motores principais em vários tipos de pequenos navios, tais como rebocadores, navios de abastecimento e de pesca, ou utilizados como motores auxiliares em embarcações de maiores dimensões. Os motores pertencentes à categoria 3, com potências de 2500-70.000 kW, são geralmente usados em navios de grandes dimensões como navios porta-contentores, petroleiros, porta-aviões e navios de cruzeiro, sendo que a aplicação de sistemas de controlo de emissões nos motores de categoria 3 é limitada. Os limites do nível 2 apresentados na legislação estabelecida pela EPA são semelhantes aos limites de nível II do Anexo VI da Convenção MARPOL para as emissões de NO_x, mas também fazem referência aos limites dos Hidrocarbonetos (HC), Material Particular (PM) e Monóxido de Carbono (CO). (Chu Van et al., 2019)

2. Regulamentação Internacional

2.1. IMO

Desde há muito tempo que se reconhece a necessidade de medidas que tenham em conta os impactos ambientais por parte do tráfego marítimo, algumas das quais adotadas por alguns países nos meados do século XIX. Vários países sugeriram a necessidade de um organismo internacional para estudar e legislar sobre este assunto de resolver este assunto de uma forma mais eficaz, mas este tema só teve seguimento quando chegou às mãos das Nações Unidas. Em 1948 realizou-se uma conferência internacional em Genebra em que foi fundada a IMO. Inicialmente não fora este o nome dado, mas sim IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization), mas o nome foi alterado em 1982 para a atual IMO. Só em 1958 é que a IMO entrou oficialmente em funções, tendo-se reunido pela primeira vez e no ano seguinte. (*History of IMO*, n.d.)

Os objetivos da Organização estão descritos nas alíneas do artigo 1 da Convenção, que são, principalmente, "providenciar mecanismos de forma a cumprir a cooperação entre governos no domínio da regulamentação governamental e práticas relacionadas com questões técnicas de todos os tipos que afetam o transporte marítimo envolvidas no comércio internacional; Incentivar e facilitar a adoção geral das mais elevadas normas praticáveis em matéria de segurança marítima, eficiência da navegação e prevenção e controlo da poluição marítima dos navios". A Organização está também habilitada a tratar de questões administrativas e legais relacionadas com estes fins. (*Convention on the International Maritime Organization*, n.d.)

A primeira intervenção da IMO foi a adoção de uma nova versão da Convenção Internacional para a Segurança da Vida no Mar (SOLAS), o mais importante de todos os tratados que tratam da segurança marítima. Isto foi conseguido em 1960 e a IMO começou a dar mais importância a questões como a facilitação do tráfego marítimo internacional, as linhas de carga e o transporte de mercadorias perigosas, tendo-se, entretanto, revisto o sistema de medição da tonelagem dos navios. Mas, embora a segurança fosse e continue a ser a responsabilidade mais importante da IMO, começou a surgir um novo problema - a poluição. O aumento do volume de crude transportado por via marítima, e o porte crescente dos petroleiros, foi particularmente preocupante e o desastre de Torrey Canyon, em 1967, em que foram derramados 120.000 toneladas de petróleo, veio chamar,

definitivamente, a atenção para a dimensão do problema. O derrame abrangeu desde as praias do sul da Inglaterra (cerca de 200 km da costa de Cornsuh), das Ilhas do Canal da Mancha e noroeste da França.(*History of IMO*, n.d.)(Wells, 2017)

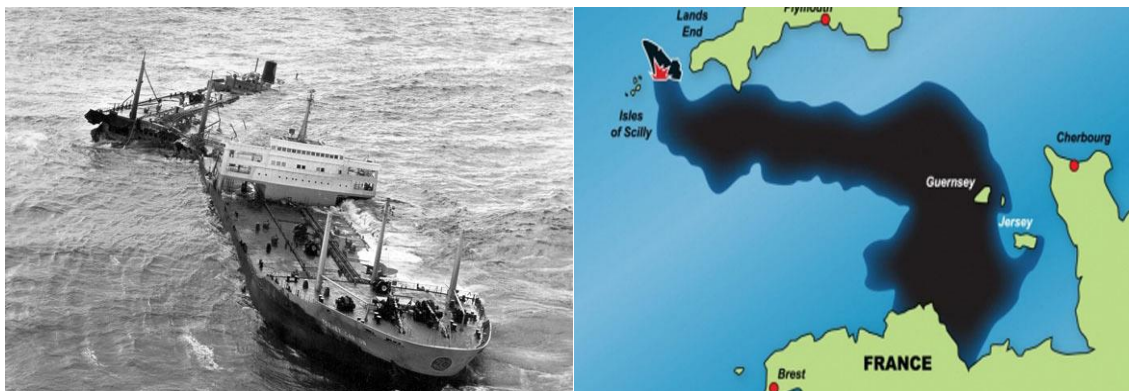


Figura 6-O navio Torrey Canyon (esquerda) e área abrangida pelo derrame (direita)(*Torrey Canyon: The world's first major oil tanker disaster - SAFETY4SEA*, n.d.)(*PERSONAL PROFILE | Colin de la Rue*, n.d.)

Durante os anos seguintes, a IMO introduziu uma série de medidas destinadas a prevenir acidentes com petroleiros e a minimizar as suas consequências. Abordou igualmente a ameaça ambiental causada por operações de rotina, tais como a limpeza de tanques de carga de petróleo e a eliminação de resíduos de casas de máquinas. As medidas mais importantes foram estabelecidas pela Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição dos Navios, de 1973, alterada pelo Protocolo de 1978 relativo ao mesmo tema (MARPOL 73/78). Este instrumento abrange não só a poluição acidental e operacional a partir de derrames de petróleo, mas também a poluição por produtos químicos, mercadorias embaladas, esgotos, lixo e poluição atmosférica. A IMO foi incumbida de estabelecer um sistema de compensações àqueles que sofram financeiramente devido a acidentes relacionados com o derrame de matérias poluentes. Nesse âmbito foram adotados dois tratados, em 1969 e 1971, que permitiram às vítimas da poluição do petróleo obter uma compensação muito mais simples e rápida. Ambos os tratados foram alterados em 1992 e, novamente, em 2000, para aumentar os limites das indemnizações a pagar às vítimas da poluição. Desde então, foram desenvolvidas várias outras convenções jurídicas, a maioria das quais dizendo respeito a questões de responsabilidade e compensação.(*History of IMO*, n.d.)

A partir de 1970 foi iniciado um sistema global de busca e salvamento, com a criação da Organização Internacional de Satélites Móveis (IMSO), que melhorou consideravelmente a comunicação via rádio e a troca de mensagens padronizadas com os

navios. O Sistema Global de Socorro e Segurança Marítima (GMDSS) foi adotado em 1988 e começou a ser aplicado a partir de 1992. Em fevereiro de 1999, o GMDSS tornou-se plenamente operacional, de modo a que agora um navio em perigo em qualquer parte do mundo é socorrido muito mais facilmente, mesmo que a guarnição do navio não tenha tempo para pedir ajuda, uma vez que a mensagem será transmitida automaticamente. (*History of IMO*, n.d.)

Duas iniciativas na década de 1990 são especialmente importantes na medida em que se relacionam com a componente humana no transporte marítimo. Em 1 de julho de 1998, entrou em vigor o Código Internacional de Gestão da Segurança e tornou-se aplicável aos navios de passageiros, petroleiros e embarcações de alta velocidade de carga de 500 ton brutas ou superiores. Tornou-se aplicável a outros navios de carga e unidades móveis de perfuração offshore de 500 ton bruta e superior a partir de 1 de julho de 2002. (*History of IMO*, n.d.)

No dia 1 de fevereiro de 1997, entraram em vigor as alterações de 1995 da Convenção Internacional sobre normas de formação, certificação e de serviço de quartos para os marítimos. Melhoraram consideravelmente as normas destinadas ao pessoal embarcado e, pela primeira vez, conferiram à própria IMO poderes para verificar as ações dos governos com as partes obrigadas a apresentar informações à própria IMO sobre o cumprimento da Convenção. Em 2010, foi concluída uma grande revisão da Convenção e do Código STCW com a adoção das alterações “*Manila amendments to the STCW Convention and Code*”. (*History of IMO*, n.d.) (*Convenção STCW / FOR-MAR*, n.d.)

Foram adotadas na década de 2000 novas convenções relativas ao meio marítimo, incluindo uma relativa a sistemas anti-incrustantes, outra sobre gestão da água de lastro para impedir o transporte não intencional de espécies exóticas e outra sobre reciclagem de navios (*Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships*, 2009). (*History of IMO*, n.d.)

A década de 2000 também assistiu a uma aposta na segurança marítima, com a entrada em vigor, em julho de 2004, de um novo regime de segurança abrangente para o transporte marítimo internacional, incluindo o Código Internacional de Segurança das Instalações Marítimas e Portuárias (ISPS), tornado obrigatório ao abrigo das alterações da Convenção SOLAS adotadas em 2002. Em 2005, a IMO aprovou alterações à Convenção para a Supressão de Atos Ilícitos Contra a Segurança da Navegação Marítima

(SUA), 1988 e o seu protocolo conexo (os Protocolos SUA de 2005), que entre outras coisas, introduzem o direito de um Estado abordar um navio de bandeira de outro estado, quando a parte que solicita tiver motivos razoáveis para suspeitar que o navio ou alguém a bordo do navio está, ou está prestes a ser envolvido, na prática de uma infração ao abrigo da Convenção. (*History of IMO*, n.d.)

À medida que as ferramentas da IMO entraram em vigor e foram implementadas, a evolução tecnológica e/ou as lições aprendidas com os acidentes levaram à adoção de alterações. A aposta na implementação contínua, com o programa de cooperação técnica a ser uma vertente-chave do trabalho da IMO. O regime de auditoria dos Estados Membros da IMO, que se tornou obrigatório ao abrigo de vários instrumentos chave da IMO a 1 de janeiro de 2016, desempenhará cada vez mais um papel fundamental no apoio à aplicação efetiva, proporcionando a um Estado Membro auditado um objetivo abrangente da avaliação da eficácia da administração e implementa os instrumentos obrigatórios da IMO abrangidos pelo regime. (*History of IMO*, n.d.)

A IMO tem como missão:

“A missão da Organização Marítima Internacional como uma agência especializada das Nações Unidas é promover a navegação segura, ambientalmente correta, eficiente e sustentável através da cooperação. Isto será realizado através da adoção dos mais elevados padrões normativos de segurança marítima e de segurança, eficiência da navegação e consideração de prevenção e controle da poluição por navios, bem como através das questões legais relacionadas a efetiva implementação dos instrumentos da OMI, com vista à sua aplicação universal e uniforme.” (*History of IMO*, n.d.) (*Organizações Internacionais relacionadas com a atividade do Instituto Hidrográfico*, n.d.)

2.2. Corpo Regulatório Inicial

2.2.1. A Conferência de Genebra de 1948

A Conferência de Genebra foi inaugurada em fevereiro de 1948 e, em 6 de março de 1948, foi adotada a Convenção que institui a Organização Intergovernamental Consultiva Marítima (IMCO) cujo nome foi alterado em 1982 para Organização Marítima Internacional (IMO). Os objetivos da nova Organização foram resumidos no artigo 1 da Convenção, sendo os objetivos principais os já mencionados anteriormente:

- a) “Instituir mecanismos de cooperação entre os governos no domínio da regulamentação governamental e das práticas relacionadas com questões técnicas de todos os tipos que afetam o transporte marítimo envolvido no comércio internacional, e incentivar a adoção geral das mais elevadas normas praticáveis em matéria de segurança marítima e eficiência da navegação”;
- b) “Incentivar a eliminação de ações discriminatórias e restrições desnecessárias por parte dos governos que afetam o transporte marítimo envolvidos no comércio internacional, a título de promover a disponibilidade de serviços marítimos para o comércio do mundo sem discriminação; A assistência e o incentivo concedidos por um Governo para o desenvolvimento do seu transporte marítimo nacional e para efeitos de segurança não constituem, por si só, discriminação, desde que essa assistência e incentivo não se baseiem em medidas destinadas a restringir a liberdade de envio de todas as bandeiras para participar no comércio internacional”;
- c) “Prever a apreciação pela Organização de questões relativas a práticas restritivas desleais por questões de transporte marítimo em conformidade com a parte II”;
- d) “Prever a consideração pela Organização de quaisquer questões relativas ao transporte marítimo que lhe possam ser submetidas por qualquer órgão ou agência especializada das Nações Unidas”;
- e) “Promover o intercâmbio de informações entre governos sobre assuntos em análise pela Organização”.

No texto da convenção de 1948, não houve qualquer referência à poluição marítima ou ao ambiente, sendo que hoje em dia tal constitui uma das maiores preocupações da IMO. A segurança marítima só foi referida brevemente, no final da alínea a. A ênfase foi na ação económica para promover a "liberdade" e acabar com a "discriminação". As alíneas b) e c) eram preocupantes para vários governos que consideravam promessas de criar "um mundo sem discriminação" e de tomar medidas contra "práticas restritivas desleais," como interferência perigosa na prática da livre iniciativa. (*Convention on the International Maritime Organization*, n.d.) (The et al., 2015)

Esperava-se que após esta Convenção estes objetivos entrassem em vigor o mais rapidamente possível. A Conferência de Genebra criou um comité preparatório para tratar de questões como a regulamentação processual, os projetos de regulamentos financeiros e uma agenda provisória. Decidiu igualmente que uma conferência de revisão da SOLAS,

que se realizou em Londres no final de 1948, deveria elaborar disposições tendo em conta os deveres e funções que tinham sido atribuídos à IMO, com a intenção de se delegar futuras responsabilidades para a Convenção. No entanto, para alguns países, grande parte do artigo 1 foi inaceitável. Alguns países receavam que o tratado conduzisse a interferências nas suas próprias indústrias e leis marítimas nacionais, outros consideraram que a Convenção da IMO foi escrita por forma a beneficiar um punhado de países que dominavam o transporte marítimo na época. Em meados da década de 1950, o atraso na ratificação da convenção da IMO estava a causar preocupação. A Convenção SOLAS de 1948 precisava ser refeita, começaram também a surgir novos problemas marítimos, entre os quais a poluição devido ao petróleo. Foi a partir daqui que se começaram a estabelecer os primeiros objetivos em termos do combate à poluição e de maiores preocupações com o meio ambiente. Em 1954, uma conferência em Londres adotou a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Petróleo e concordou que se tornaria da responsabilidade da IMO assim que a nova organização fosse criada. Houve muitas declarações registadas que tiveram o efeito de restringir consideravelmente a área de atividades da Organização. Vários países usaram uma afirmação idêntica que "é no domínio das questões técnicas e náuticas que a Organização pode dar o seu contributo, para o desenvolvimento do comércio marítimo do mundo. Se a Organização alargar as suas atividades a assuntos de natureza puramente comercial ou económica, poderá surgir uma situação em que o Governo (do país em causa) possa considerar em deixar de cumprir os objetivos estabelecidos pela Organização"

2.3. Convenção MARPOL

A MARPOL é a principal convenção internacional que abrange a prevenção da poluição do meio marinho por navios devido a causas operacionais ou acidentais. A Convenção MARPOL foi adotada em 2 de novembro de 1973 na IMO. O Protocolo de 1978 foi adotado em resposta a uma onda de acidentes com petroleiros em 1976-1977. Como a Convenção MARPOL de 1973 ainda não tinha entrado em vigor, o Protocolo MARPOL de 1978 absorveu essa convenção. Enquanto a IMO inicialmente se concentrava em questões de segurança e navegação, expandiu o seu foco para as questões ambientais, tornando-se ativa na adoção internacional de medidas, que lidam com vários impactos ambientais por causa do transporte marítimo. A convenção MARPOL tem seis anexos, que se baseiam, cada um, numa diferente origem de poluição:

- Anexo I, Regulamento para a prevenção da poluição por petróleo;
- Anexo II, Regulamento para o controlo da Poluição por substâncias líquidas nocivas transportadas a granel;
- Anexo III, Prevenção da poluição por substâncias prejudiciais transportadas por via marítima em embalagens, contentores, tanques portáteis, camiões-tanque e vagões cisternas;
- Anexo IV Prevenção da poluição por esgotos sanitários de Navios;
- Anexo V Prevenção da poluição por lixo dos navios;
- Anexo VI Prevenção da poluição atmosférica dos navios.

Os regulamentos combinados entraram em vigor em 2 de outubro de 1983. Em 1997, foi adotado um protocolo para alterar a convenção e foi acrescentado um novo anexo VI, que entrou em vigor a 19 de maio de 2005. A MARPOL foi atualizada através de alterações ao longo dos anos. (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*, n.d.)(Leeuwen & Kern, 2013)

Apesar do empenho dos Estados membros, fundamental para o sucesso na aplicação de qualquer instrumento jurídico internacional, era evidente uma falta de medidas pró-ativas e positivas dos respetivos estados para a implementação de instrumentos legais nos respetivos territórios. Outros fatores também foram responsáveis, tais como procedimentos pouco atuantes, a falta de recursos técnicos e a não implementação de certas disposições nas respetivas aplicações, foram as principais razões do generalizado incumprimento ambiental. Consequentemente, houve um aumento cada vez maior na pressão, a nível mundial, para a definição de regras e obrigações no mundo desenvolvido a fim de criar tecnologia e assistência financeira para alcançar os objetivos ambientais. Com isto houve a necessidade de criar uma convenção com o principal foco nas questões ambientais a nível marinho, em que se estabeleceram vários pontos a serem cumpridos, expostos em cada um dos anexos criados ao longo dos anos.(Karim, 2010)

2.3.1. Regras Gerais para os Diferentes Tipos de Poluição

A convenção MARPOL é o instrumento legal global mais dirigido para a prevenção da poluição marinha com origem nos navios, que abrange todas as questões técnicas relevantes. Introduziu regras e requisitos que levaram à conceção e construção

de sistemas e equipamentos dirigidos ao controlo e prevenção da poluição. Foram impostas obrigações a observar pelos navios e operadores, através de um sistema de certificações, inspeções e inquéritos. Além disso, esta convenção apela aos estados costeiros, de uma forma não obrigatória, para fornecer instalações de receção para a eliminação de resíduos, esgotos, lixo e outras substâncias perigosas. (Karim, 2010)

A MARPOL concebeu principalmente jurisdição prescritiva e de execução destinada aos estados de bandeira. No entanto, na eventualidade de qualquer violação dos requisitos da MARPOL dentro da jurisdição de um Estado costeiro, as respetivas sanções podem ser estabelecidas de acordo com a lei daquele Estado. O significado do termo "dentro da jurisdição" deve ser determinado à luz do direito internacional em vigor, para que exista um critério aceite por todas as partes que permita aplicar e interpretar as normas estabelecidas pela convenção. (Karim, 2010)

Como mencionado anteriormente, a MARPOL introduziu um sistema de certificação. A maioria dos navios que utilizam o transporte marítimo internacional têm que apresentar um conjunto de certificados a bordo, como forma de comprovar o cumprimento da convenção. Qualquer país pode inspecionar um navio para verificar se possui estas certificações, enquanto estes navios estão nos portos do respetivo país. Se porventura houver razões claras para acreditar que a condição do navio ou o seu equipamento não corresponde substancialmente ao estabelecido nos certificados, o estado do porto pode deter o navio. (Karim, 2010)(Rulefinder et al., 2009)

A questão da jurisdição tem gerado alguns problemas práticos devido ao facto de muitos navios adotarem as chamadas bandeiras de conveniência. A partir de 1 de janeiro de 2004, 64% do total da tonelagem dos navios mercantes do mundo foi registada fora do estado do proprietário. Muitos destes países têm um registo aberto, sendo que, não têm uma "ligação genuína" com o navio que lhes dê o direito de hastear a sua bandeira. Além disso, os seus navios muito raramente ou nunca visitam a sua própria área marítima. Estes países não são um incentivo para a regulação ou implementação adequada de instrumentos internacionais. (Karim, 2010)(Rulefinder et al., 2009)

Os regulamentos que abrangem os vários tipos de poluição gerada por navios estão contidos nos seis anexos da MARPOL e atualizados regularmente. Os anexos I e II, que fazem alusão à poluição proveniente de derrames de petróleo e produtos químicos, são obrigatórios, mas os anexos III, IV, V e VI, que fazem referência a materiais embalados,

esgotos, lixo e poluição atmosférica, respetivamente, são opcionais. Os anexos da MARPOL 73/78 podem ser alterados através de um processo de "aceitação tácita".(Karim, 2010)(Rulefinder et al., 2009)

Neste trabalho consideraremos apenas o Anexo VI por ser aquele que faz referência à poluição por parte de emissões nocivas para a atmosfera com origem em navios.

2.3.2. Anexo VI da Convenção MARPOL

A IMO começou a trabalhar nos problemas causados pela poluição atmosférica devido ao transporte marítimo a partir do ano de 1980. Em 1997, os estados membros da IMO adotaram um novo anexo, nomeadamente o anexo VI à Convenção MARPOL para a prevenção da poluição atmosférica por ação do transporte marítimo internacional. O Anexo VI entrou em vigor a 19 de maio de 2005. O anexo impõe as normas que regulam as emissões de NO_x e a instalação obrigatória de sistemas de limpeza dos gases de evacuação para reduzir as emissões. Também foi imposto um limite para o conteúdo de SO_x no combustível, bem como requisitos de tecnologias para limitar as emissões de SO_x. O anexo também prescreve tecnologias para reduzir as emissões de compostos orgânicos voláteis (COV) e restringe a utilização de algumas substâncias que prejudicam a camada de ozono. O Anexo VI proíbe a incineração a bordo de determinadas substâncias, que podem ser lançadas para o ambiente, bifenilos policlorados⁴ (PCBs), e também inclui regulamentação para facilitar a receção do excesso de enxofre e halons em determinadas circunstâncias.(Karim, 2010)(*PCBs / Ambiente / SGS Portugal*, n.d.)

O Anexo VI contém igualmente disposições relativas à declaração de emissões especiais de SO_x nas áreas de controlo de emissões (SECA). Nestas áreas existem normas de emissões de enxofre mais rigorosas, as quais estabelecem um teor máximo de enxofre no combustível embarcado, de 1,5%.(Karim, 2010)

⁴PCBs (polychlorinated biphenyl) são utilizados em muitos produtos, desde transformadores e materiais de construção até tintas e pigmentos, alguns são tóxicos e podem ser lançados no ambiente a partir de aterros sanitários e incineração industrial.

Contudo o Anexo VI da convenção MARPOL desagradou a muitos países, cujo grau de exigência era menos rigoroso e exigente. O Anexo VI impôs um limite máximo global de 4,5% de enxofre em combustíveis marítimos até 1 de janeiro de 2012. Embora o nível médio global de enxofre nos combustíveis marítimos se encontrasse na gama de 2,5% a 3,5%, medida estabelecida a partir de 1 de janeiro de 2012 até 1 de janeiro de 2020, um acordo mais rigoroso estava difícil de ser alcançado devido à pressão da indústria petrolífera e ao interesse dos Estados exportadores de petróleo. A medida que se seguia veio estabelecer um valor ainda mais baixo do teor de enxofre na composição do combustível marítimo para 0,50%, em que esta medida entra em vigor a partir de 1 de janeiro de 2020. (Karim, 2010)(VI & Da, 2010)

Os estados da UE declararam que a ratificação do presente anexo não deverá limitar o seu direito de impor limites mais rigorosos nas águas da UE, sendo que as SECA estabelecidas pelo presente anexo se encontram na UE. O Conselho Europeu e Parlamento promulgaram uma diretiva em julho de 2005, diretiva 2005/33/CE, que introduziu uma norma em que o teor de enxofre no fuelóleo pesado passará a ser de 1% dentro dos territórios dos estados membros (artigo 3 (1) da respetiva diretiva), tratando-se de um objetivo mais rigoroso do que aquele estabelecido pelo Anexo VI da convenção MARPOL.(Karim, 2010)(Europeu et al., 2006)

A diretiva também introduziu um limite de 0,1% do teor de enxofre, apresentado no artigo 4 B, para os combustíveis marítimos utilizados por navios que naveguem nas suas águas e para navios atracados em portos europeus. Esta mesma diretiva entrou em vigor a partir de 2010 declarando claramente o objetivo de "reforçar as posições dos estados membros com base nas negociações da IMO, nomeadamente para promover, na fase de revisão do Anexo VI da convenção MARPOL, a consideração de medidas mais ambiciosas no que diz respeito ao teor de enxofre nos combustíveis utilizados pelos navios".(Karim, 2010)(Europeu et al., 2006)

O anexo VI da convenção MARPOL demorou oito anos a entrar em vigor, enquanto a tecnologia avançava significativamente. Em julho de 2005, apenas dois meses após a entrada em vigor do Anexo VI, o Comité de Proteção do Ambiente Marinho da IMO decidiu submeter o Anexo VI a uma revisão geral para controlar a poluição atmosférica de todas as fontes. Finalmente, o MEPC 57⁵ aprovou algumas grandes alterações ao anexo VI da MARPOL. A mudança mais importante foi a de uma redução

⁵ MEPC 57 são alterações ao anexo do protocolo relativas à internacional Convenção para a Prevenção da Poluição dos Navios.

progressiva das emissões de óxido de enxofre (SOx) dos navios, com um a redução para 3,50% (do anterior valor de 4,50%), a partir de 1 de janeiro de 2012. Em seguida, progressivamente para 0,50 %, a partir de 1 de janeiro 2020, sujeito a uma revisão de viabilidade a concluir o mais tardar em 2018. Além disso, os limites aplicáveis nas zonas de controlo das emissões de enxofre seria reduzido para 1,00%, a partir de 1 de março de 2010 (a partir da corrente 1.50 %), sendo ainda reduzido para 0,10 %, a partir de 1 de janeiro de 2015.(Karim, 2010)(Europeu et al., 2006)

2.4. Implementação dos Objetivos e Medidas Preconizadas

A implementação representa outro importante papel que a IMO tem envolvido intensivamente. A eficácia dos instrumentos estabelecidos pela IMO depende da sua, implementação uniforme e eficaz, no entanto, ao longo dos anos, a IMO reconheceu que os seus instrumentos não são totalmente implementados e postos em prática pelos estados. Em particular, um número significativo de estados de bandeira são incapazes ou não estão dispostos a assumir plenamente as suas responsabilidades ao abrigo da IMO a partir das medidas estabelecidas pelas convenções de segurança e prevenção da poluição.(Basaran, 2016)

Como resposta ao problema da implementação, a IMO desenvolveu, melhorou e manteve uma série de soluções, nomeadamente as resoluções e declarações, os vários instrumentos regulatórios da IMO, disposições relativas às inspeções nos portos, e a criação de postos de controlo regional de portos, em que estas medidas estão indicadas e listadas como instrumentos definidos pela IMO. Estes instrumentos são também uma indicação de uma das características mais importantes que reflete a evolução do trabalho da IMO na última década, que é o fortalecimento progressivo da jurisdição dos estados nos portos com vista a corrigir o incumprimento das regras e normas da IMO por navios estrangeiros. No entanto, a exigência de maior transparência e de prestação de contas elevou à convicção de que para garantir o cumprimento da missão da IMO era necessário um maior poder executivo. (Basaran, 2016)

O Comité, posteriormente, adotou uma auditoria voluntária dos estados membros da IMO (regime de auditoria voluntária) em 2005. Este instrumento é destinado a fornecer aos estados membros uma abrangente e objetiva avaliação da eficácia da administração e implementação dos instrumentos IMO obrigatórios que são abrangidos pelo regime.

Embora o regime de auditoria voluntária seja necessário, é como o seu nome sugere, voluntária ou opcional e, portanto, é considerado como uma das leis suaves da IMO, que não tendo um mecanismo para lidar com o incumprimento, é bastante questionável a nível global.(Basaran, 2016)

Após a introdução bem-sucedida da auditoria voluntária, a IMO decidiu avançar para a adoção de um regime de auditoria obrigatória. A assembleia da IMO, decidiu tornar obrigatório o regime de auditoria em novembro-dezembro de 2009. De acordo com esta resolução, o regime de auditoria seria feito por fases como um esquema institucionalizado e obrigatório através da introdução de requisitos adequados com relevantes instrumentos estabelecidos pela IMO de carácter obrigatório. Logo depois, houve uma reunião para ser adotada uma série de resoluções e alterações relativas à organização do regime de auditoria obrigatória, abrindo caminho para a entrada do regime com entrada em vigor até 2016.(Basaran, 2016)

Relativamente a objetivos e medidas estabelecidos pela convenção MARPOL, claramente que prescreve passos para resolver os problemas e não apenas princípios ou recomendações políticas. A eficácia de um regime ambiental global depende em grande parte da implementação e execução adequadas, e um elevado nível de conformidade pelos estados. Uma vez que uma convenção internacional é acordada, é transmitida aos estados signatários para ratificação e implementação. Implementação significa tomar as medidas necessárias para tornar a regra do tratado internacional eficaz no direito interno. O programa das Nações Unidas para o Ambiente fornece uma definição inclusiva de implementação que inclui, entre outros, todas as leis, regulamentos, políticas e outras medidas e iniciativas, que todas as partes têm de adotar e/ou tomar para cumprir as suas obrigações ao abrigo de um acordo ambiental multilateral. Embora muitas das partes interessadas do processo de implementação são basicamente protagonistas não-estatais, esta definição exclui o seu papel.(Karim, 2010)

O cumprimento é um termo mais amplo do que a implementação. Aplica-se tanto a um estado que tem que cumprir as suas obrigações, bem como o comportamento do estado em conformidade com os princípios já estabelecidos. As obrigações podem ser realizadas de algumas formas, tais como estabelecer uma norma para descarga dos navios de acordo com a convenção MARPOL, ou, como por exemplo, relatos à IMO ao abrigo da convenção MARPOL. Além disso, há a questão de saber se o instrumento jurídico internacional é cumprido, pois, só se sabe a resposta a esta questão a partir de um

conhecimento prévio. A aplicação é um termo muito mais estreito, e envolve a imposição de sanções por incumprimento. (Karim, 2010)

Finalmente, foi demonstrado que há uma distinção nítida entre a conformidade e a eficácia, uma vez que a conformidade não garante automaticamente a eficácia. A eficácia é, sem dúvida, algo mais do que uma mera adesão às obrigações. Ao se examinar a eficácia de qualquer instrumento jurídico internacional ambiental, é necessário ter capacidade de análise da própria legalidade das normas. Um pouco por essa razão as convenções marítimas internacionais ambientais, como a MARPOL, não são muito efetivas nos países em desenvolvimento. Isto não implica que estes instrumentos sejam muito bem-sucedidos nos países desenvolvidos pois permanece a dúvida sobre porque devem os estados cumprir a regulamentação ambiental internacional. A resolução de problemas ambientais, em obediência a um instrumento jurídico internacional ambiental pode criar uma série de benefícios gerais que constituem o incentivo à ratificação e cumprimento, pelos Estados, das convenções internacionais do ambiente. Tais benefícios podem incluir, entre outros aspetos, a proteção da saúde pública, melhor governação, cooperação e, solidariedade internacional, assistência financeira, assistência técnica, benefícios económicos de longo prazo, e em alguns casos, oportunidades de comércio. A implementação bem-sucedida de instrumentos jurídicos internacionais ambientais num país em desenvolvimento dependerá, em grande parte, de quão eficaz o tratado em questão for, na geração destes fatores positivos para um determinado país. (Karim, 2010)

3. Estado da Arte

3.1. Medidas Tomadas

Os regulamentos estabelecidos pela convenção MARPOL referentes ao anexo VI, entraram em vigor em 19 de maio de 2005, com o objetivo de reduzir as emissões globais de óxidos de azoto (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e partículas materiais (PM) de motores marítimos. Existiu, portanto, uma necessidade de resposta de alguns países costeiros de reduzirem as emissões de SO_x dos navios nas suas áreas de jurisdição, em que foram estabelecidas as Áreas de Controlo de Emissões de Enxofre (SECA) descritas no Anexo VI. As SECA englobam a área do Mar Báltico, a área do Mar do Norte, a região norte-americana (incluindo o setor costeiro dos Estados Unidos e Canadá), e as áreas do Mar das Caraíbas (em redor de Porto Rico e das Ilhas Virgens dos Estados Unidos). (Chu Van et al., 2019)

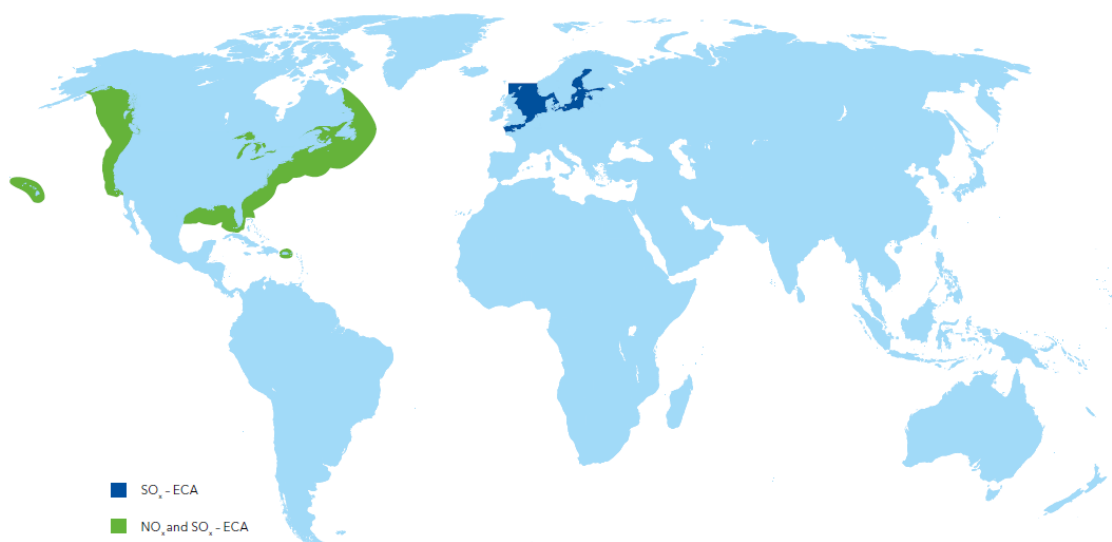


Figura 7- Mapa das atuais zonas ECA (López, 2015)

A fim de controlar as emissões de SO_x e PM, o teor de enxofre nos combustíveis deve ser reduzido, uma vez que aumenta significativamente as emissões. A emissão de SO_x pelos motores diesel marítimos forma aerossóis de sulfato ou partículas que contêm enxofre, que constituem o principal componente das PM. Além disso, as emissões de SO_x também são capazes de condensar formando partículas de pequeno tamanho que podem fixar-se a partículas maiores, resultando num crescimento de compostos de partículas. Estas partículas são uma contribuição importante para a poluição atmosférica e também

têm um papel na formação de aerossóis marítimos. Por conseguinte, a IMO não limita particularmente as emissões de PM diretamente, mas controla a parte que relaciona a formação de PM a partir da libertação de enxofre. Faz isso através dos requisitos de teor de enxofre nos combustíveis no regulamento 14 do anexo VI. O valor máximo para o teor de enxofre dos combustíveis marítimos utilizados para os navios que operam nas SECA foi reduzido de 1% para 0,1% em 1 de janeiro de 2015, como já referido nos capítulos anteriores. Como alternativa à utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre, existem sistemas aprovados para a redução das emissões, tais como os *scrubbers* de SOx que poderão vir a ser utilizados de forma dominante. No caso deste tipo de sistemas de redução de emissões é necessária a aprovação dos estados de bandeira do respetivo navio. Os *scrubbers* desempenham um papel como filtros dos gases de evacuação do motor por forma a remover o SOx, utilizando água como forma de lavagem, que será descarregada diretamente no oceano. Esta água, pode ser tratada com produtos químicos e reutilizada durante algum tempo antes de ser descarregada ou tratada através de um modo conjunto das técnicas referidas. Uma análise da eficiência dos custos de três opções de redução - a montagem de *scrubbers* nos navios que utilizem os combustíveis HFO (*Heavy Fuel Oil*), LSHFO (*Low-Sulphur Heavy Fuel Oil*), e usando diesel – descobriu-se que usar HFO combinado com a instalação de *scrubbers* dá o menor custo. No entanto, esta opção beneficia os navios que operam a altas velocidades, o que aumentará o consumo de combustível e as emissões de gases com efeito de estufa como o CO₂. Por isso, a redução do SOx através da utilização de *scrubbers* pode resultar num aumento de CO₂.(Chu Van et al., 2019)

O Regulamento 13 do Anexo VI da Convenção MARPOL ajuda a controlar as emissões de NOx dos motores diesel usados atualmente e dos novos motores diesel marítimos com uma potência superior a 130 kW. Os diferentes níveis de exigência, estabelecidos, dependem da data da construção do navio e da velocidade do motor. Constata-se que os requisitos de nível III se aplicam apenas às novas embarcações que operam em áreas de controlo das emissões de óxido de azoto (NECA) estabelecidas para limitar as emissões de NOx, nomeadamente nas regiões da América do Norte e do Mar das Caraíbas. Sabe-se que as emissões de NOx derivam de vários parâmetros do motor, tais como a temperatura de combustão, tempo envolvido no processo de combustão, presença de oxigênio e o atraso na inflamação.(Chu Van et al., 2019)(VI & Da, 2010)

As normas de emissão da IMO são geralmente referidas em três níveis. As normas de nível I foram definidas na versão de 1997 do anexo VI da convenção MARPOL, enquanto as normas de nível II e III foram introduzidas pelas alterações do anexo VI adotadas em 2008. O anexo VI aplica-se retroativamente a novos motores superiores a 130 kW instalados nos navios construídos em ou após 1 de janeiro de 2000, ou que sofram uma importante modificação após essa data. Em antecipação à ratificação do anexo VI, a maioria dos fabricantes de motores marítimo fabrica motores em conformidade com as normas de nível I desde 2000. As alterações do anexo VI foram aprovadas em outubro de 2008 e ratificadas por 53 países. (US Energy Information Administration, 2015)

As ECA estabelecidas garantem que os navios cumprem os limites de NOx de nível III da IMO. Os limites de nível I e de nível II são normas globais, enquanto as normas de nível III se aplicam apenas nas NECA. Os limites NOx de nível III aplicar-se-ão a todos os navios que operem dentro duma NECA construída em ou após 1 de janeiro de 2016 com motores superiores a 130 kW. A Figura 8 mostra as normas de emissões de NOx adotadas pelo anexo VI, que são definidas com base na velocidade máxima de funcionamento do motor (número de rpm). (US Energy Information Administration, 2015)

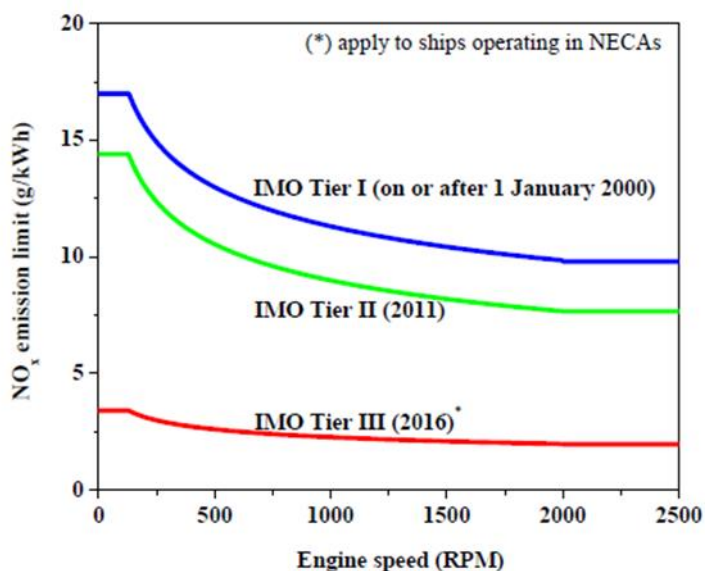


Figura 8- Regulamentos da IMO sobre emissões de NOx (IMO, 1999)(Chu Van et al., 2019)

3.2. Alternativas Definidas

Os regulamentos que instituem as emissões dos navios nas ECA irão alterar o consumo de combustível marítimo no futuro, bem como haverá uma enorme modificação ao nível dos dispositivos de controlo que operam a bordo dos navios. Tendo em conta a isto, esta secção apresenta algumas das estratégias mais prováveis.

3.2.1. Navios de LNG

Dado que a indústria marítima está a considerar alternativas ao HFO, uma parte do mercado passará para o gásóleo marítimo (MGO) ou irão aderir ao LNG ou a outros combustíveis alternativos. O transporte marítimo que ocorre fora das áreas das ECA, em que pode ser utilizado HFO, ou combustível de baixo enxofre (LSFO) dependerá de futuras regulamentações globais. Os navios que operam parcialmente nas áreas da ECA provavelmente escolherão o MGO como combustível de conformidade. No entanto, o transporte pesado nas áreas da ECA pode constituir um incentivo suficiente para uma mudança completa para o LNG. Os motores que utilizam LNG podem danificar alguns sistemas de redução de emissões instalados e não necessitam de medidas de redução de NOx especializadas para satisfazer o Nível III das emissões de NOx. A potencial falta de controlo das emissões, em conjugação com o custo do combustível significativamente mais baixo, torna o LNG uma opção atraente para o cumprimento das regras estabelecidas. Os únicos navios de grandes dimensões que atualmente utilizam o LNG como combustível em viagens internacionais são os porta-contentores. Para que o LNG se torne um combustível utilizado na maioria dos navios, deve ser criada uma rede global de terminais com de LNG. Caso contrário, os navios alimentados a LNG limitar-se-ão aos comércios costeiros em que se estabelecem pequenas redes para esse efeito. (US Energy Information Administration, 2015)

Os navios de LNG utilizam, essencialmente, gás natural (GN) que é uma mistura de hidrocarbonetos leves, cujo principal componente de 85-96% de metano (CH₄) em volume, com menores proporções de etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀), pentano (C₅H₁₂) e azoto (N₂) como componente inerte. (Gómez & Baaliña, 2017)

O sistema de propulsão dos navios de LNG implica a geração e consumo do *boil-off gas*⁶ (BOG). Uma maneira de classificação dos sistemas de propulsão dos navios de LNG é de acordo com a produção do BOG durante o processo de transporte. Tanto os

combustíveis utilizados como os regulamentos de emissões são fatores que influenciem a direção dos sistemas de propulsão dos navios de LNG.(Gómez & Baaliña, 2017)

O sistema principal de propulsão em navios de LNG tem sido, desde 1960, baseado em turbinas, pois este sistema permite a queima simultânea, em caldeiras, de combustível pesado, e do BOG gerado durante o transporte. A instalação, alimentará as turbinas e os turbogeradores. Desde 2003, os sistemas de propulsão de navios de LNG têm estado em constante desenvolvimento, as turbinas estão a ser substituídas por motores de combustão interna devido a melhorias na eficiência e porque, como acima referido, estes também permitem a queima de combustível pesado, bem como BOG.(Gómez & Baaliña, 2017)

Esta mudança observou-se em vários petroleiros, que adotaram o metano a partir da data mencionada e que começaram a adotar estes motores de combustão interna. Estes motores, capazes de consumir diferentes tipos de combustível, são conhecidos pelo acrónimo DF, *Dual Fuel*. Os motores DF, utilizam uma pequena quantidade de gasóleo, aproximadamente 1 a 8%, para ignição na câmara de combustão e utilizando o gás em funcionamento normal. Este tipo de motores tem como principal ciclo de funcionamento o ciclo *Otto*. Os motores DF desenvolvidos por volta do ano de 2003, são de 4 tempos, no entanto, na atualidade, devido aos avanços tecnológicos são também utilizados em motores de 2 tempos. A seguir, descrever-se-ão alguns dos principais sistemas de propulsão de navios de LNG.(Gómez & Baaliña, 2017)

3.2.1.1. Turbina a Vapor

Um sistema de propulsão com turbinas, compreende geralmente, duas caldeiras com uma capacidade de geração de 80-90 ton/h de vapor superaquecido a uma pressão de 60-70 bar a 520 °C, com o objetivo de alimentar as turbinas de alta e baixa pressão. O arranjo das turbinas é tipicamente *Cross-Compound*⁷, com uma potência entre 35 MW e 45 MW. O vapor, uma vez expandido em ambas as turbinas, é condensado num condensador principal e enviado de volta para a caldeira através de bombas, depois de passar por uma série de aquecedores que, aproveitam o calor residual, aumentando a

⁶ Boil-Off gas (BOG) durante o transporte do gás natural liquefeito, este é transportado perto da temperatura de vaporização, esta vaporização conhecida como boil-off tem de ser removida dos tanques para manter a pressão do tanque de carga.

⁷ Cross-Compound é um sistema de turbinas a vapor na qual existem dois módulos, um módulo de alta pressão e um módulo de baixa pressão, que operam de forma conjunta para retirar trabalho da fonte de vapor.

eficiência térmica do ciclo. Uma vez dentro da caldeira, ocorre a mudança de estado, novamente, através da entrada de calor, voltando novamente à fase de vapor, fechando assim o ciclo.(Gómez & Baaliña, 2017)

A geração de energia elétrica a bordo é fornecida por dois turbogeradores que são alimentados pelo próprio vapor gerado nas caldeiras, como ilustrado em Figura 9. (25)

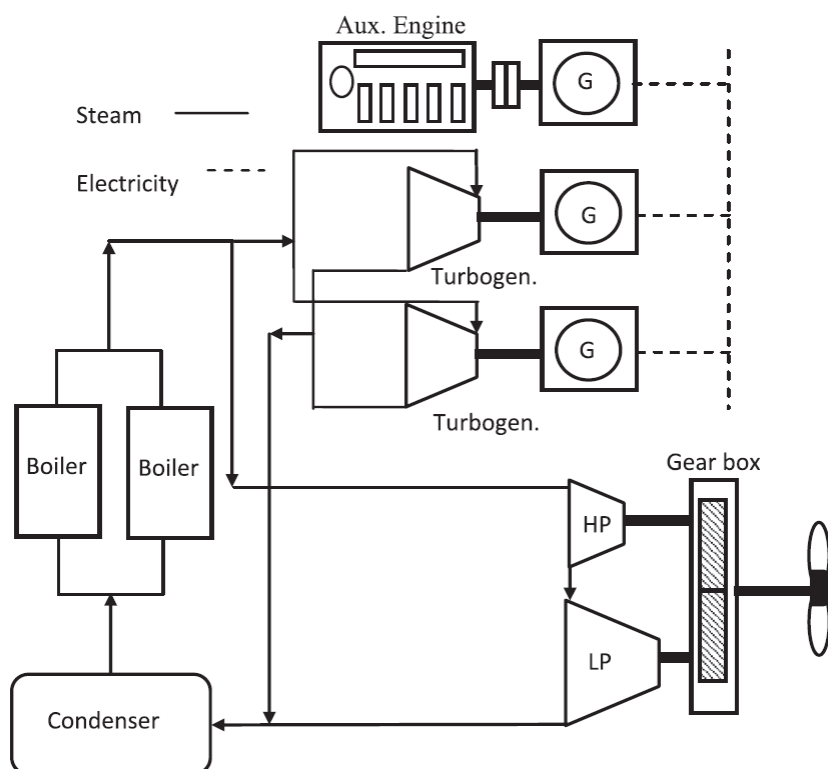


Figura 9-Configuração de um sistema básico de propulsão através de turbina a vapor(Gómez & Baaliña, 2017)

Cada gerador tem uma potência média de 10 MW que, juntamente com um gerador diesel de 3 MW, é o suficiente para sustentar energeticamente o navio em qualquer situação. As caldeiras são projetadas para, simultaneamente, consumir diferentes tipos combustíveis como o óleo combustível⁸ e o BOG, conferindo versatilidade ao sistema. O fornecimento de gás dos tanques de carga às caldeiras é realizado através de compressores centrífugos denominados LD (Low Duty).(Gómez & Baaliña, 2017)

⁸ Óleo Combustível é um derivado do petróleo em que é uma fração residual da destilação das frações mais leves do petróleo, como a gasolina, a nafta, o querosene e o óleo diesel.

Tais compressores têm lâminas de ângulo de ataque variável, acionados por um motor elétrico de velocidade variável, que regula o fornecimento de gás às caldeiras tendo em conta as necessidades do navio. O excesso de BOG gerado enquanto o navio está num porto ou fundeado, situação em que o sistema de propulsão está fora de serviço, é também queimado nas caldeiras, produzindo vapor, mas sem qualquer tipo de conversão em energia útil. Este vapor é enviado diretamente para o condensador após a passagem por um processo conhecido como "dumping". O objetivo deste processo é estabilizar a pressão nos tanques. (25)

3.2.1.2. Turbina a Gás

A turbina a gás (TG) foi uma inovação tecnológica introduzida nos navios de LNG devido à sua capacidade de consumir diesel e BOG sem quaisquer limitações. A sua elevada fiabilidade deriva da experiência acumulada na indústria aeronáutica e possui uma elevada relação potência/peso, o que se traduz num tamanho reduzido da instalação. As primeiras organizações a instalar TG's como sistemas de propulsão principal, foram as Marinhas de guerra e também os navios de passageiros. Essa combinação de turbinas a gás com turbinas a vapor ou geradores diesel destinava-se a produzir energia elétrica. Pelo contrário, nos navios a LNG com propulsão por TG, a propulsão não está associada com qualquer outro sistema de geração de energia elétrica, porque todo o BOG é usado como combustível. (Gómez & Baaliña, 2017)

As TG's podem ser combinadas com meios de propulsão elétrica, este sistema é denominado por DFGE (*Dual-Fuel Gas Turbine Electric Propulsion*), como mostrado na Figura 10. (Gómez & Baaliña, 2017)

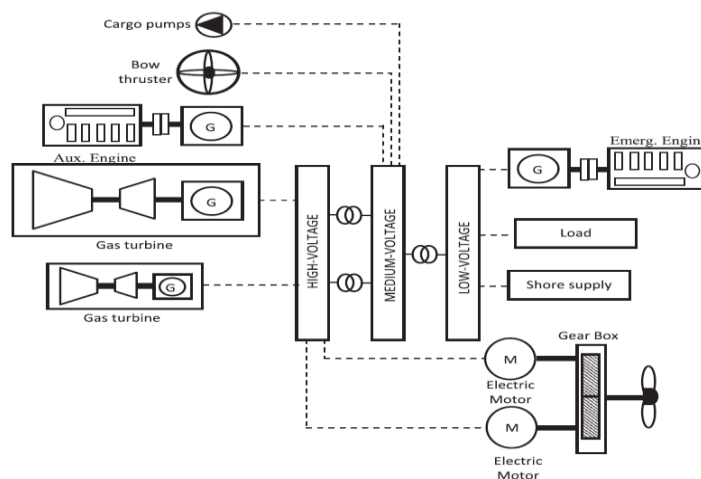


Figura 10- DFGE (Dual-Fuel Gas Turbine Electric Propulsion)(Gómez & Baaliña, 2017)

O grande consumo deste tipo de sistemas, juntamente com a necessidade de se usar combustíveis limpos bastante dispendiosos de modo a cumprir os regulamentos, faz com que as turbinas sejam uma opção menos atraente e limitada, em geral, a ser usada nos meios navais. No entanto, o TG permite a recuperação do calor residual para a implementação num ciclo combinado, em que há um aumento da eficiência até 40%. Há também a possibilidade de usar o BOG como combustível, o que seria uma opção a considerar a instalação de um sistema de propulsão em navios de LNG. Existem diferentes configurações de sistemas combinadas, que podem ser subdivididos em dois grupos:

- Ciclo combinado ativado por energia;
- *Combined Gas Turbine Electric & Steam System (COGES)*.

Ciclo combinado ativado por energia

O ciclo combinado ativado por energia é uma instalação incomum em navios a LNG, porque a geração de potência é feita a partir da instalação de um gerador auxiliar, a Figura 11 ilustra um esquema de um ciclo combinado ativado por energia.(Gómez & Baaliña, 2017)

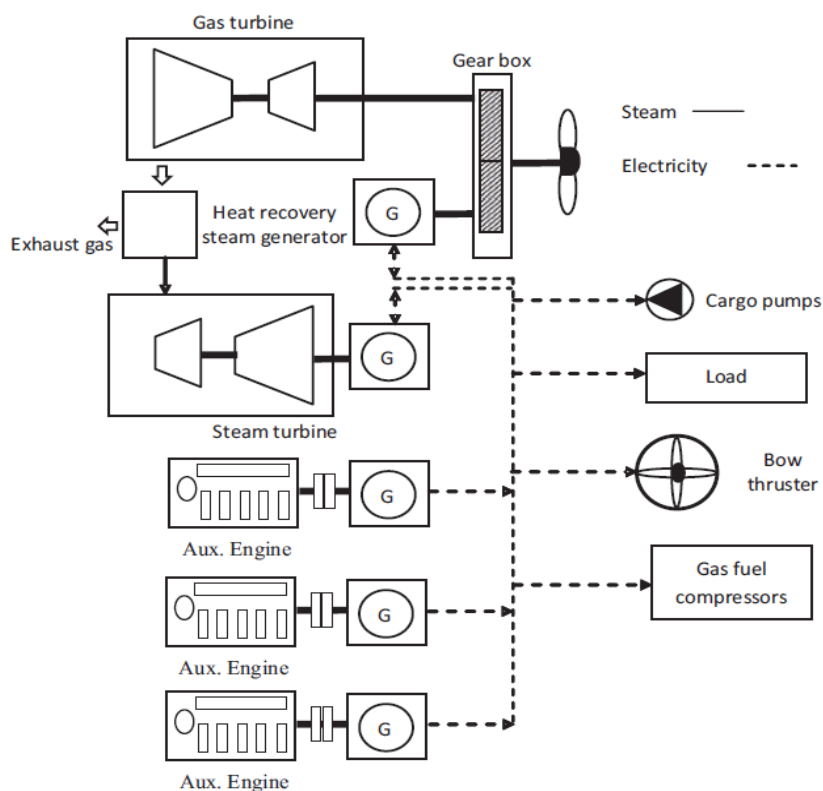


Figura 11-Esquema de um ciclo combinado ativado por energia(Gómez & Baaliña, 2017)

O sistema compreende uma TG de cerca de 36 MW destinada ao propulsor. Os gases de evacuação gerados na TG são enviados para a caldeira de recuperação onde fornecem a entrada de calor necessária para gerar vapor que é enviado para uma turbina de cerca de 10 MW, acoplada a um gerador que fornece energia ao navio durante a navegação. O sistema também inclui três geradores auxiliares com uma capacidade combinada de 6 a 12 MW, estes geradores são usados para a produção de energia quando o navio está atracado, para quando ambas as turbinas estão paradas. (Gómez & Baaliña, 2017)

Combined Gas Turbine Electric & Steam System (COGES)

Os sistemas COGES são ciclos combinados movidos por energia elétrica. Estes sistemas são compostos por elementos semelhantes àqueles que formam um sistema de ciclo combinado ativado por energia, mas com uma diferença de concepção, nos seus componentes da propulsão principal elétrica. Dois esquemas podem ser distinguidos no sistema COGES de dois fabricantes, a *Rolls-Royce* e a *General Electric*. A Figura 12 retrata o esquema de um sistema COGES concebido pelo fabricante *Rolls-Royce*. (Gómez & Baaliña, 2017)

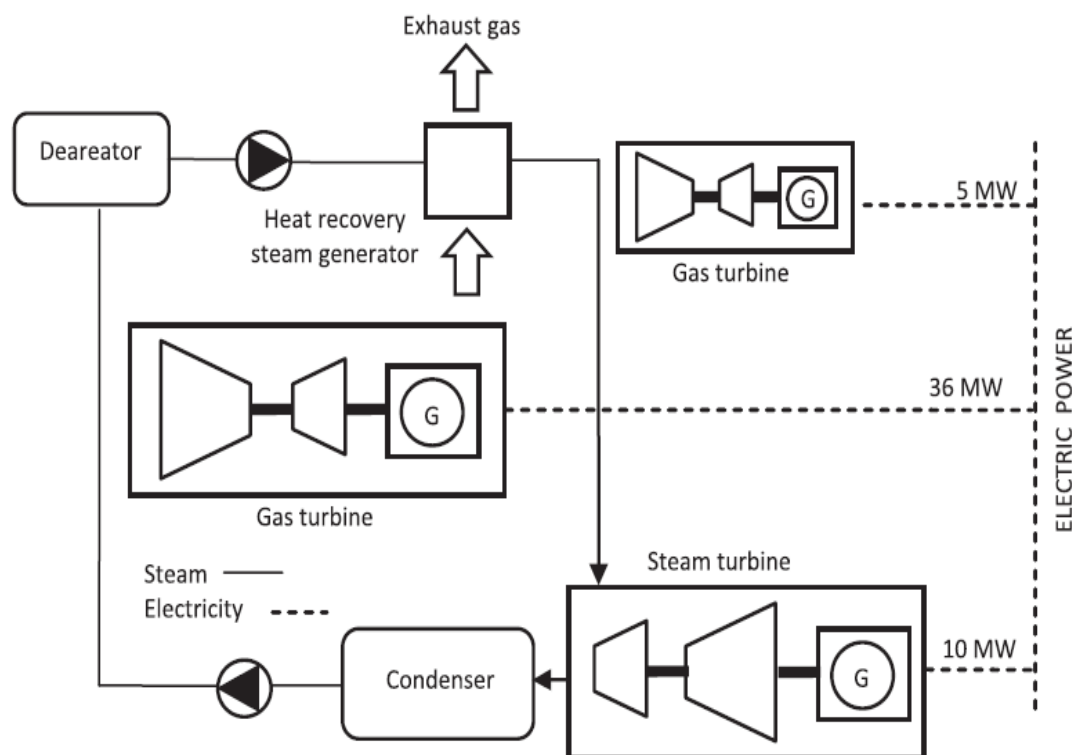


Figura 12- Sistema COGES desenhado pela *Rolls-Royce* (Gómez & Baaliña, 2017)

O esquema tem duas TG's com diferentes potências, uma de 36 MW e outra de 5 MW, projetada de tal forma que os gases de evacuação da TG com maior potência são aproveitados por um gerador de vapor da recuperação de calor dos gases de evacuação. O vapor gerado é usado por uma turbina a vapor de 10 MW, que, juntamente com a TG de maior potência, fornecem a energia elétrica necessária para o funcionamento da propulsão do navio durante a navegação. Por outro lado, o propósito da turbina menos potente (5 MW) é gerar energia nos portos, evitando assim o alto consumo de combustível causada pela TG principal. Na Figura 13 está representado outro sistema COGES que foi concebido pelo fabricante *General Electric*.(Gómez & Baaliña, 2017)

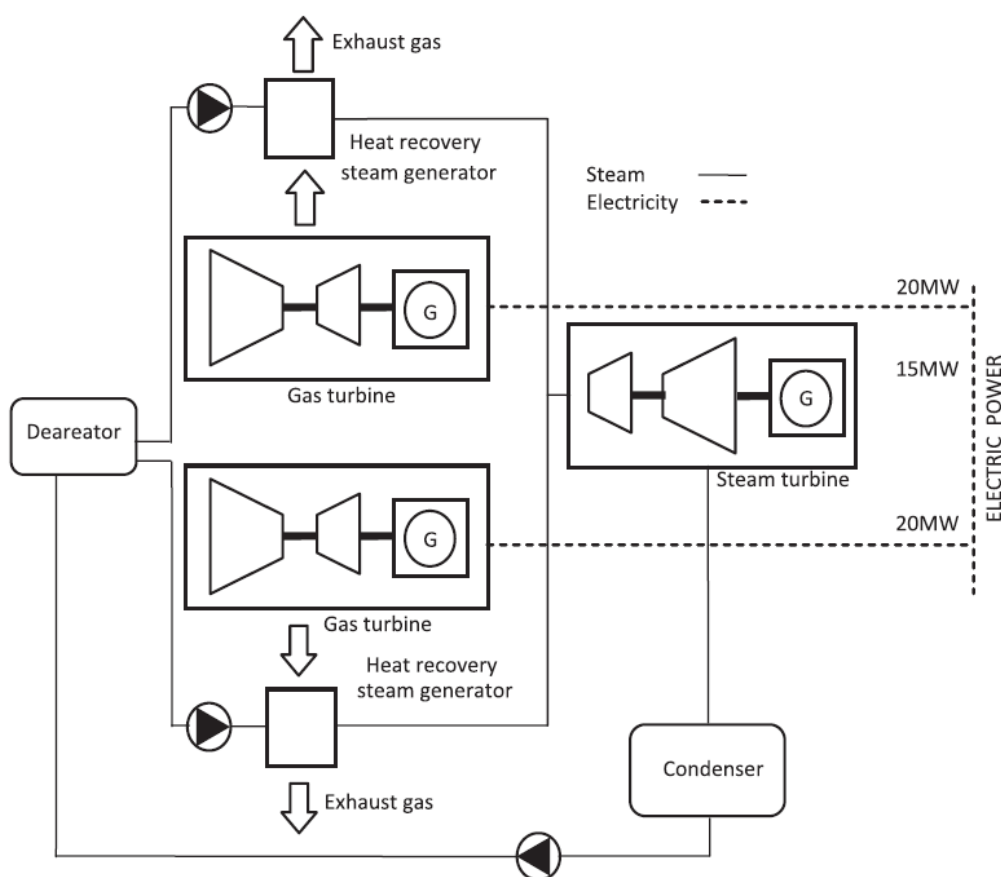


Figura 13-Sistema COGES desenhado pela *General Electric*(Gómez & Baaliña, 2017)

O esquema tem duas turbinas a gás, cada uma de 20 MW. A fiabilidade deste tipo de sistema aumenta porque cada uma das TG's, poderia garantir 50% do fornecimento de energia elétrica. A desvantagem, no entanto, é o seu alto consumo enquanto atracado nos portos, uma vez que não tem um gerador auxiliar de baixa potencia como no caso do design da Rolls-Royce. A turbina a vapor tem uma maior potência porque, como resultado de ter duas turbinas a gás de 20 MW, a geração de vapor proveniente do aproveitamento

do calor dos gases de evacuação aumenta em comparação com o anterior sistema, permitindo a possibilidade de instalar uma turbina de 15 MW. (Gómez & Baaliña, 2017)

3.2.1.3. Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna tornaram-se o sistema de propulsão predominante em todos os sectores do transporte marítimo, abrangendo 80% da frota mundial, com a exclusão dos navios de LNG uma vez que estes não tinham a capacidade de utilizar combustíveis diferentes, simultaneamente. Isto, no entanto, mudou com o desenvolvimento da tecnologia, em 2003, dos motores DF que se destacaram devido à sua capacidade de usar tanto combustíveis líquidos como o gás, tornando-se a nova tendência de sistemas de propulsão de navios de LNG, atingindo 159 unidades construídas até ao final de 2006. Os motores a 4 tempos DF elétricos foram os primeiros a abrir o mercado, dado que já tinham sido usados em instalações terrestres desde o início dos anos 90 para gerar energia elétrica e, em meados de 2008 apareceram os motores a 2 tempos DF. (Gómez & Baaliña, 2017)

Motor de funcionamento a baixas velocidades a dois tempos com sistema de retorno de liquefação

Dois motores de velocidade lenta foram usados como sistemas de propulsão principal no transporte de carga devido aos seus baixos custos de manutenção, alta eficiência e de usarem combustíveis de baixa qualidade. Este sistema é utilizado em navios de LNG que tenham de fazer grandes percursos marítimos, mas com a peculiaridade de integrarem um sistema de retorno de liquefação GCU⁸, como mostrado na Figura 14. O esquema do sistema de retorno de liquefação tem a função de passar para o estado líquido o BOG gerado no interior dos tanques de carga, evitando qualquer desperdício. Por outro lado, o sistema GCU⁸ foi concebido para usar o BOG gerado em caso de falha no sistema de retorno de liquefação, evitando o aumento da pressão dos tanques o que poderia causar grandes danos. As instalações de retorno de liquefação utilizadas a bordo funcionam segundo ciclo de *Rankine* inverso com uma configuração em cascata de três estágios em que o azoto (N₂) é considerado o refrigerante mais utilizado. (Gómez & Baaliña, 2017)

⁸ Gas Combustion Unit (GCU) são sistemas que regulam a pressão do tanque de carga de LNG. (Laval & Combustion, n.d.)

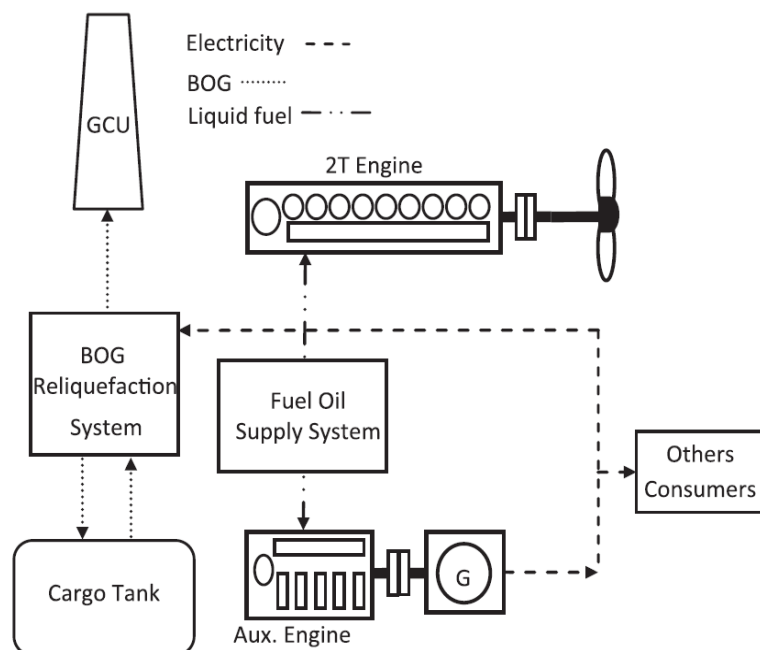


Figura 14- Configuração de um sistema de propulsão de motores diesel a 2 tempos com um esquema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017)

O BOG extraído dos tanques passa por várias fases no sistema de retorno de liquefação. Primeiro o BOG é extraído dos tanques e está sujeito a um processo de separação das pequenas gotas que se formam para evitar danos nos compressores durante a compressão. Durante a compressão, a troca de calor é efetuada com o fluido necessário para o arrefecimento, que neste caso é o N₂. Essa troca de calor é feita através de permutadores de calor, sendo que o BOG atingirá a temperatura ideal para voltar aos tanques. Anteriormente, passa por uma fase de separação do N₂, que depois é libertado para a atmosfera. Este processo está representado na Figura 15, onde é representado um diagrama do sistema de retorno de liquefação, tanto da parte referente ao gás natural bem como a parte do refrigerante N₂.(Gómez & Baaliña, 2017)

Os motores de dois tempos são altamente eficientes, mas ao considerar o desempenho geral do sistema, o sistema de retorno de liquefação deve ser levado em conta. O funcionamento do retorno de liquefação implica um alto consumo de energia fornecido por geradores auxiliares que, é composto por 3 ou 4 geradores de potência. Veja-se, por uma questão de exemplo, um navio de LNG com 149.000 m³ de gás liquefeito, em que o sistema tem um consumo de 3,5-7 MW dependendo do BOG gerado nos tanques de carga. O consumo representa 20% da energia disponível no BOG

recuperado ou de aproximadamente 20 ton de combustível por dia.(Gómez & Baaliña, 2017)

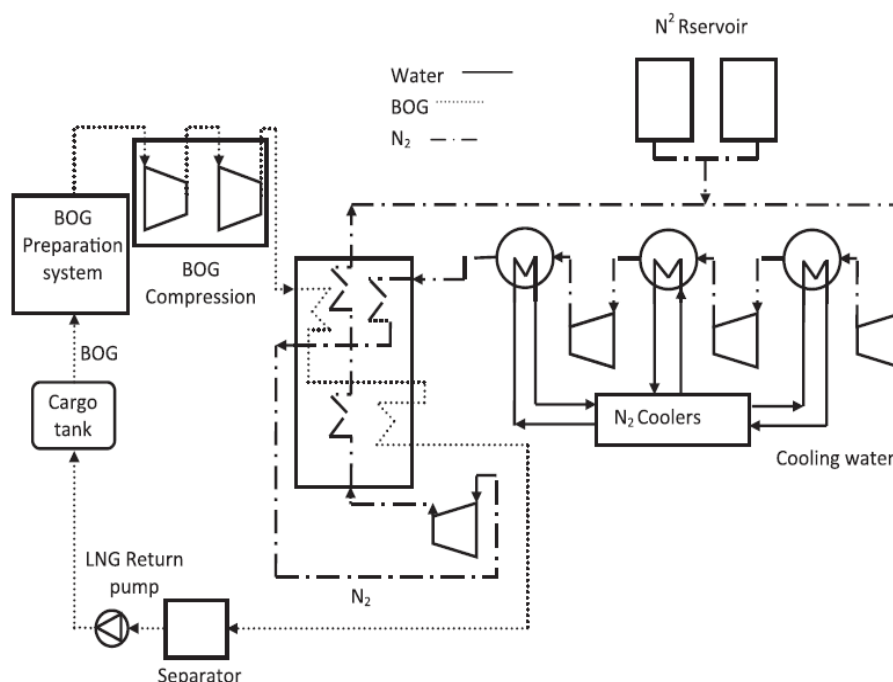


Figura 15-Esquema básico do sistema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017)

A potência auxiliar líquida do navio é aumentada devido ao sistema de retorno de liquefação, entre 14 e 16 MW, quando comparada com um sistema de propulsão de motores a 4 tempos de DF sem este sistema de retorno de liquefação. O sistema de propulsão através de motores a 2 tempos com o sistema de retorno de liquefação tem dois arranjos, principalmente dependendo do número de motores principais que inclui. A primeira opção, como ilustrado na Figura 16, é composto por um único motor principal acoplado a um hélice de passo fixo, em que a geração de energia é fornecida por três geradores diesel a 4 tempos também alimentados por combustível pesado.(Gómez & Baaliña, 2017)

À medida que as empresas distribuidoras de LNG e de classificação de navios estabelecem normas mais exigentes relativas à manutenção e ao desenvolvimento de novos equipamentos, a utilização de motores a 2 tempos a bordo, utilizando metano está a aumentar. Veja-se, por exemplo, o exemplo de dois motores a 2 tempos cada um acoplado a uma única de veio, como mostra a Figura 17.(Gómez & Baaliña, 2017)

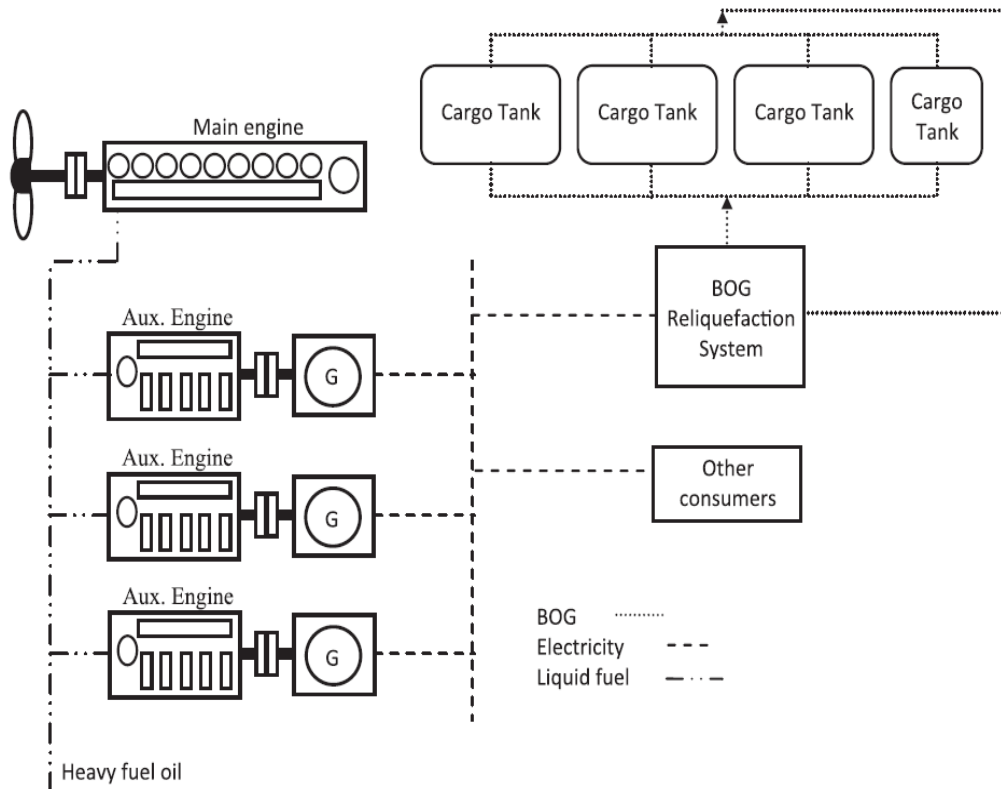


Figura 16- Sistema de propulsão com um motor principal a 2 tempos com sistema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017)

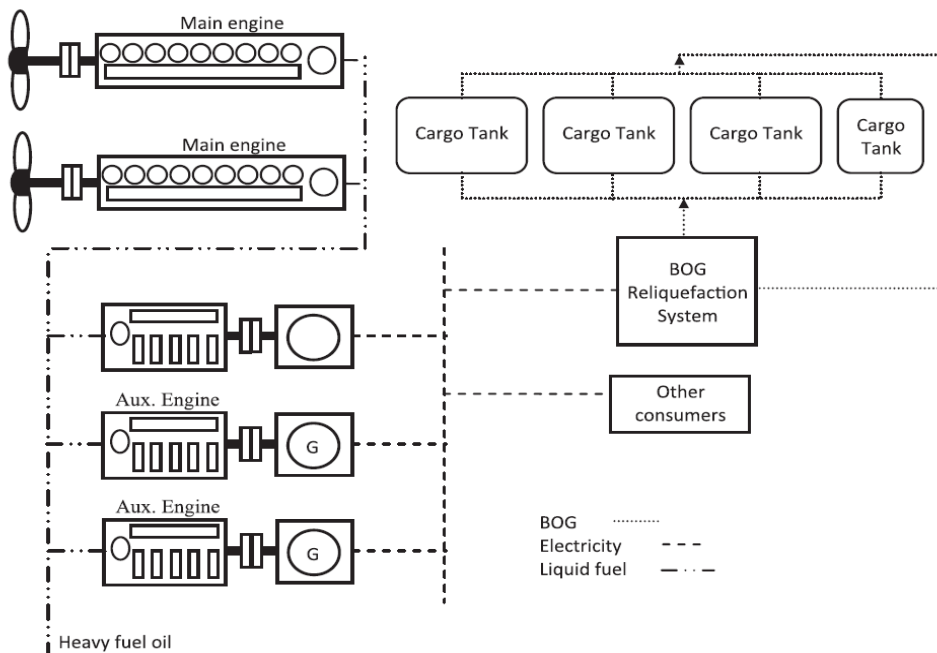


Figura 17- Sistema de propulsão com dois motores principais 2S e com sistema de retorno de liquefação(Gómez & Baaliña, 2017)

Motor de funcionamento a médias velocidades a quatro tempos (*Diesel-Electric*)

Desde o início de 2003, o número de navios de LNG recém-construídos com sistemas de propulsão utilizando motores DFDE aumentou consideravelmente. Este facto demonstra que a tendência do sistema de propulsão nos navios de LNG está orientada para a utilização de motores DF, que são capazes de consumir gás e combustíveis líquidos. A configuração típica de um sistema de propulsão diesel-elétrico através dos motores DF é mostrado na Figura 18.(Gómez & Baaliña, 2017)

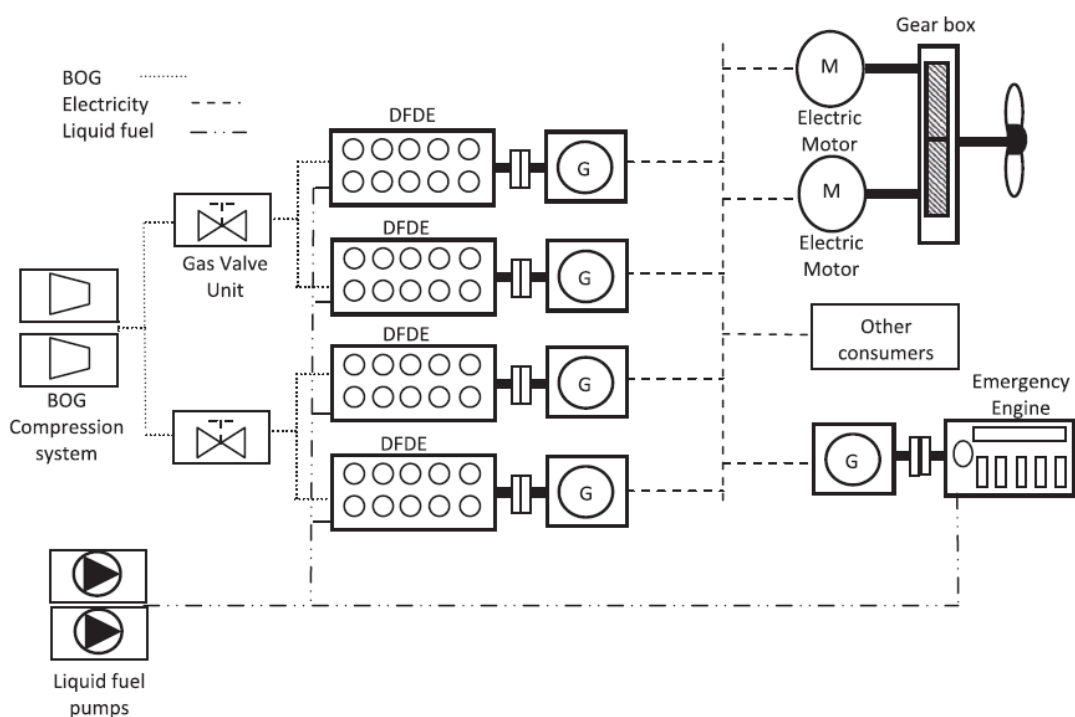


Figura 18-Configuração do sistema de propulsão Diesel-Elétrico utilizando motores DF a 4 tempos(Gómez & Baaliña, 2017)

Esta configuração tem quatro motores DF acoplados a geradores elétricos que fornecem energia a todo o navio, incluindo à propulsão, feita através de dois motores elétricos. As principais variações na configuração dos motores DF são encontradas em sistemas de propulsão, como mostrado na Figura 19, que apresenta duas configurações similares no que diz respeito à geração de energia com quatro motores de DF.(Gómez & Baaliña, 2017)

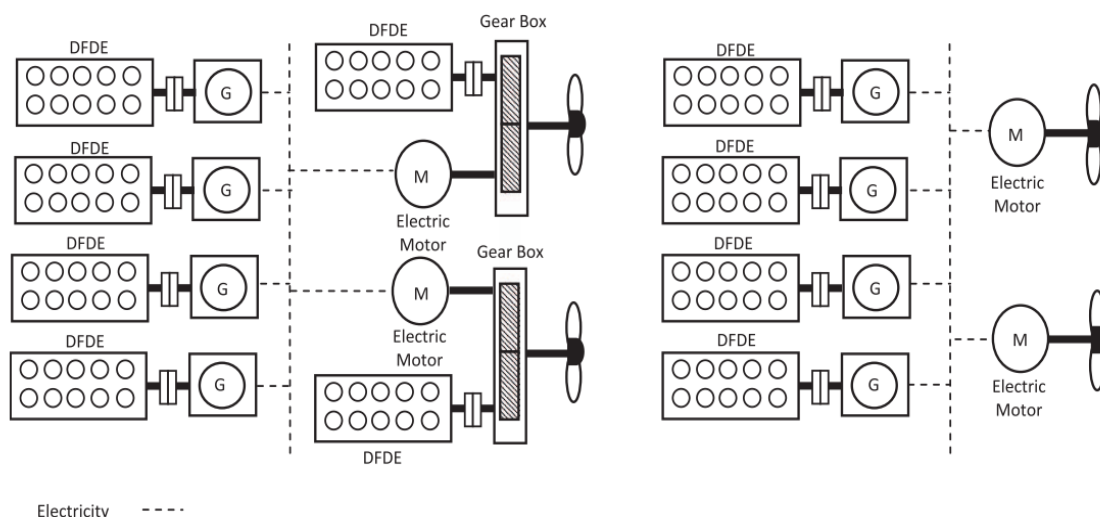


Figura 19-Configurações de sistema de propulsão Diesel-Electric utilizando motores Dual-Fuel a 4 tempos(Gómez & Baaliña, 2017)

Os motores DF têm diferentes modos de funcionamento dependendo do combustível utilizado. Quando o gás é usado como combustível (em modo gás), eles adotam o conceito do Ciclo *Otto*. Pelo contrário, se forem utilizados combustíveis como o gasóleo ou até mesmo HFO, o motor DF funciona sob um Ciclo Diesel.(Gómez & Baaliña, 2017)

Motor de funcionalidade a médias velocidades a quatro tempos (Diesel-Electric) com sistema de retorno de liquefação

A instalação de um sistema de retorno de liquefação num navio com um motor DF a 4 tempos, irá proporcionar ao sistema de propulsão uma elevada flexibilidade. Mas há que ter em conta dois fatores importantes, como os elevados custos que daí advêm após a instalação, juntamente com a quantidade de BOG gerada nos tanques consumido nos motores. Como mostrado na Figura 20, a viabilidade de instalar um sistema de retorno de liquefação em embarcações com um sistema DF é condicionada pelo BOG gerado, em cerca de 0,15% por dia, e a velocidade de operação que, dependendo de cada caso, poderá ter uma influência importante na opção a considerar.(Gómez & Baaliña, 2017)

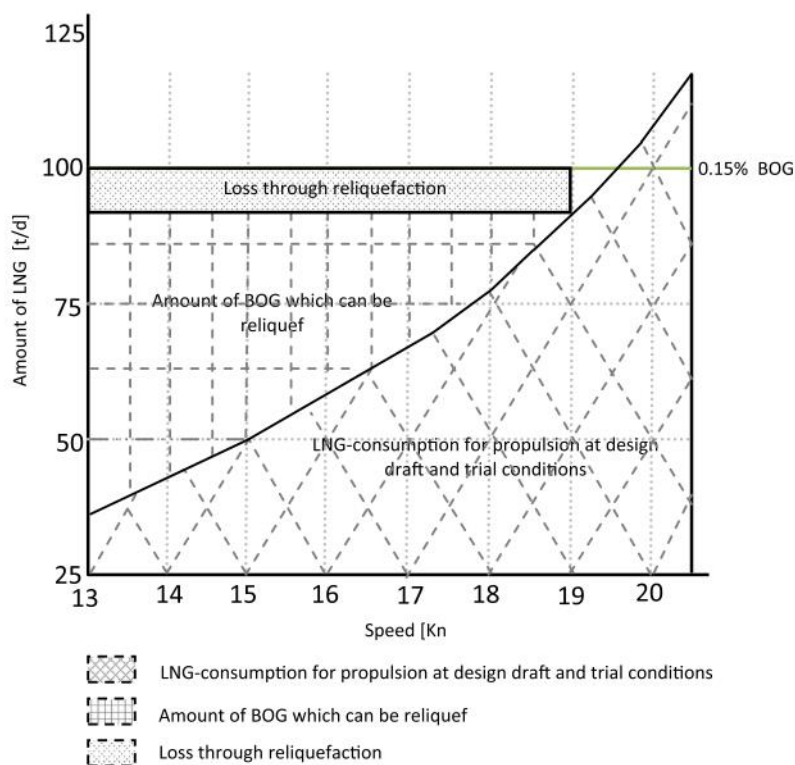


Figura 20- Relação entre a velocidade do navio e a quantidade de BOG que foi liquefeito pelo sistema (Gómez & Baaliña, 2017)

Motor de funcionamento a baixas velocidades a dois tempos (Diesel-Electric)

A propulsão através de motores DF é uma tecnologia baseada nos navios de LNG, em que a primeira instalação a bordo de um motor a 4 tempos data de 2003 a partir da experiência adquirida com unidades semelhantes na indústria em terra, a partir dos anos 80. Pelo contrário, a evolução dos motores a 2 tempos a DF foi mais lenta, não se produzindo motores a 2 tempos com injeção de gás, até 1994, tendo de se esperar até ao início do século XXI para que tal tecnologia fosse instalada nos primeiros navios. Dois tipos podem ser identificados em motores DF a 2 tempos de acordo com o pressão de injeção de gás, os de alta pressão (*MAN*) e os de baixa pressão (*Wärtsilä*). (Gómez & Baaliña, 2017)

Alta Pressão

O fabricante *MAN* foi o primeiro a desenvolver motores DF, a 2 tempos para utilização em navios de LNG, na sequência da tendência de utilização de pressões elevadas na injeção de gás dos seus motores industriais. A principal diferença dos motores a 4 tempos a DF é a injeção de gás, uma vez que é realizada diretamente na câmara de

combustão a altas pressões, 250 a 300 bar. Dois sistemas de controlo de gás dentro dos motores a 2 tempos a DF, foram desenvolvidos pela MAN, que se pode ilustrar na Figura 21. Em ambas as opções a pressão do fornecimento de gás é de cerca de 300 bar. (Gómez & Baaliña, 2017)

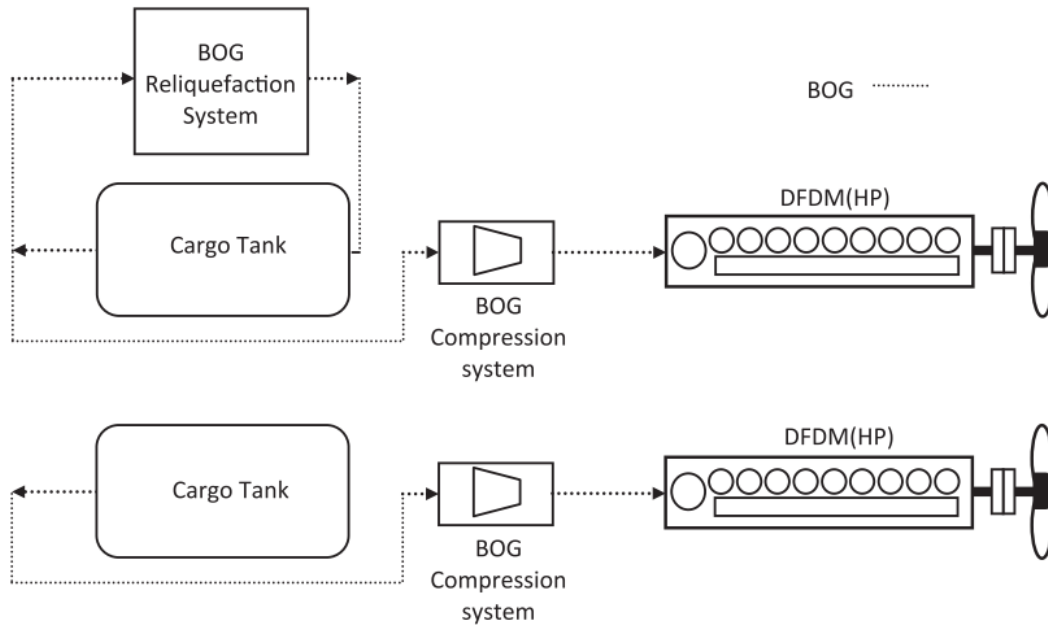


Figura 21-Gestão de gás em motores a 2 tempos de DF(Gómez & Baaliña, 2017)

Para se atingir uma pressão alta a partir dos compressores, estes devem ter capacidade para garantir a alimentação total dos motores individualmente, tal como se reflete na Figura 22, na qual se destaca o esquema dos componentes de um sistema com vários motores de propulsão. (Gómez & Baaliña, 2017)

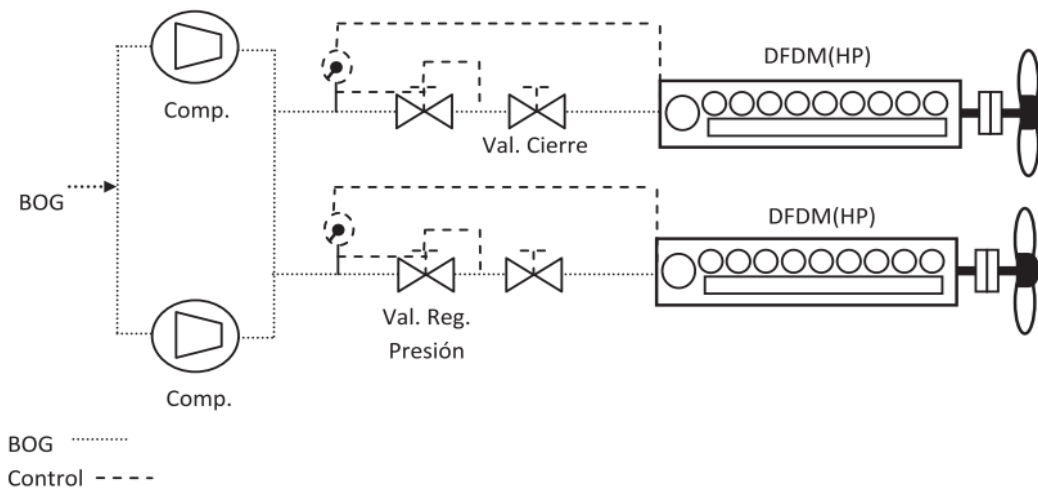


Figura 22-Esquema de motores a 2 tempos a DF(Gómez & Baaliña, 2017)

A injeção de combustível é realizada na cabeça do cilindro através de válvulas injetoras de gás (Figura 23). A alimentação de gás em direção à válvula de injeção ocorre através de furos na cabeça do cilindro, evitando qualquer fuga de gás graças à utilização de condutas de parede dupla com sensores de detecção. A pressão do gás é de cerca 300 bar, utilizando-se óleo a uma pressão entre 25 e 50 bar acima da do gás para uma vedação correta e para evitar qualquer fuga para o sistema de controlo. (Gómez & Baaliña, 2017)

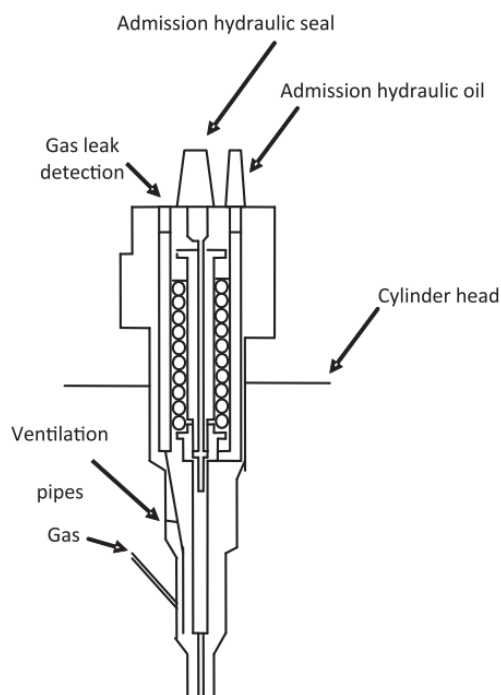


Figura 23-Válvula injetora de gás(Gómez & Baaliña, 2017)

Baixa Pressão

Na década de 1980, a *Wärtsilä* lançou motores industriais de DF de alta pressão no mercado, mas, devido ao tratamento complexo do gás, os dispendiosos sistemas de segurança a instalar e a negligenciável melhoria das emissões, estes motores foram abandonados. No final dos anos 90, os motores a 4 tempos de DF foram introduzidos no mercado. Os motores DF de baixa pressão a 2 tempos foram então desenvolvidos com base neste motor, tendo sido instalados a partir de 2013. A injeção de gás é realizada a uma pressão inferior a 16 bar quando o êmbolo no cilindro está a meio do curso, misturando-se com o ar antes de ocorrer a explosão, como mostrado na Figura 24. Uma vez misturado, é comprimido, a combustão é iniciada quando 1% da carga total de combustível tiver sido injetada pela válvula de injeção. (Gómez & Baaliña, 2017)

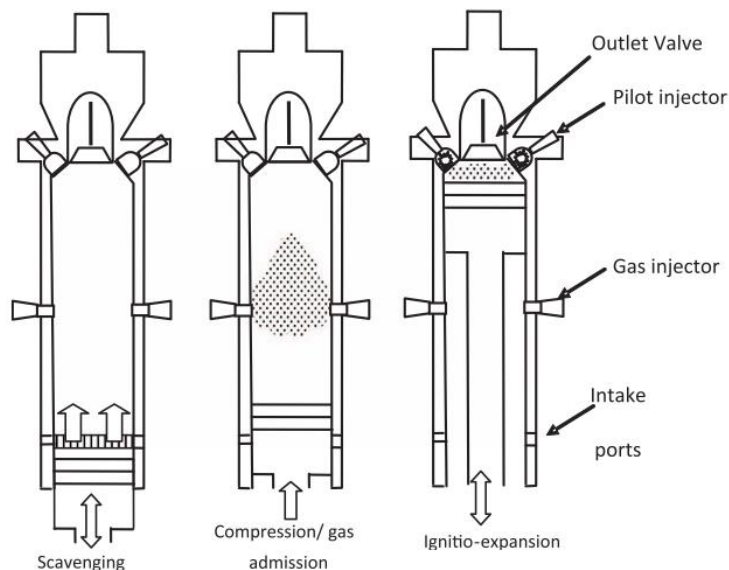


Figura 24-Componentes do sistema de injeção de gás num cilindro de motor DF a 2 tempos de baixa pressão(Gómez & Baaliña, 2017)

A fim de assegurar uma ignição estável em todas as condições, o combustível é injetado em câmaras de pré-combustão. A Figura 25 retrata o sistema de fornecimento de gás de uma baixa pressão a motores DF a 2 tempos, nos quais são destacadas oito peças.(Gómez & Baaliña, 2017)

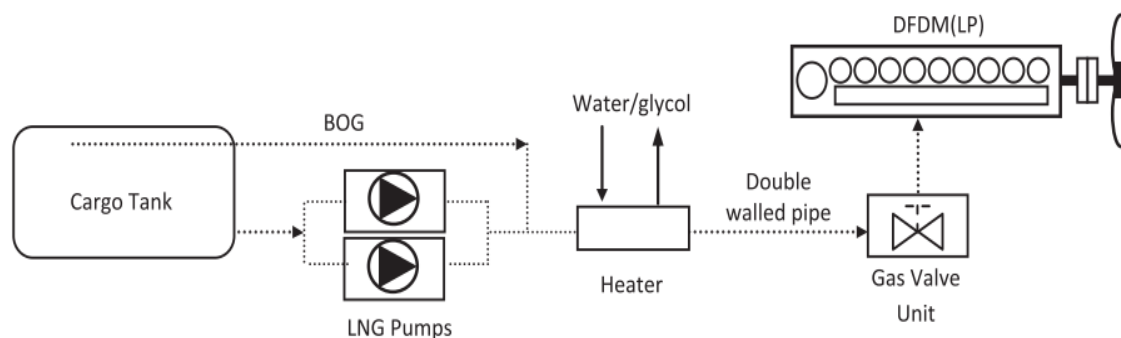


Figura 25-Sistema de fornecimento de gás de motores a 2 tempos de DF de baixa pressão(Gómez & Baaliña, 2017)

A configuração de um sistema de propulsão para navios de LNG, para implementação em motores DF de baixa pressão a 2 tempos acoplados diretamente a dois veios independentes é mostrado na Figura 26. Nesta configuração, cada motor dispõe de um sistema individual de tratamento de gás para alcançar uma maior segurança no fornecimento de gás. Para gerar energia elétrica, são equipados com três motores DF a 4 tempos acoplados aos respetivos geradores.(Gómez & Baaliña, 2017)

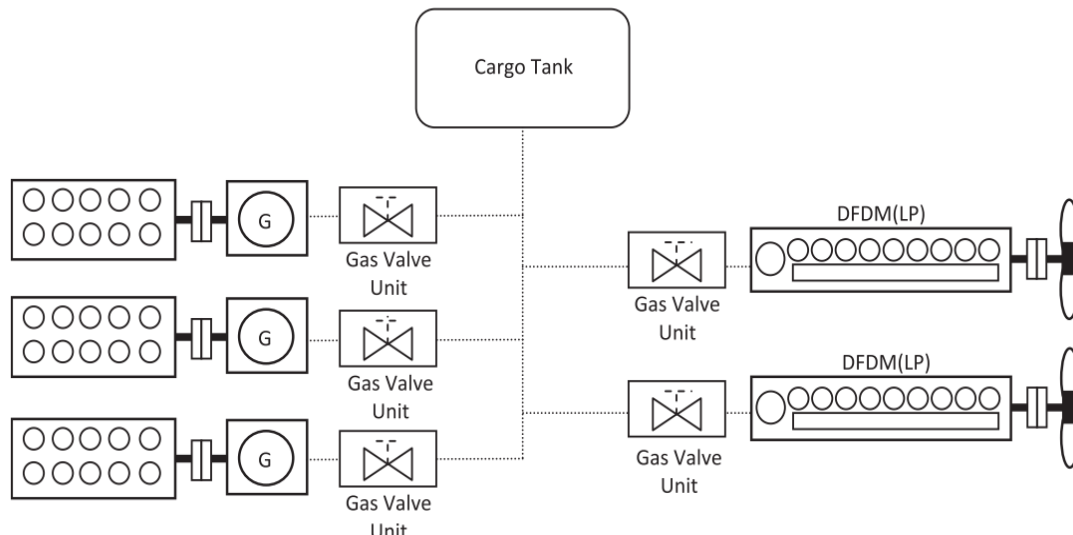


Figura 26-Configuração do sistema de propulsão de motores DF de baixa pressão a 2 tempos (Gómez & Baaliña, 2017)

3.2.2. Navios a *Dual-Fuel* (DF)

Um motor de *Dual-Fuel* é um motor de combustão interna geralmente adaptado para funcionar usando HFO ou gasóleo e que também pode queimar gás natural. Este tipo de motores já foi referido anteriormente quando se fez menção a navios de LNG pois estes dois sistemas estão ligados devido à sua forma de coexistência técnica, pelo que, apenas será feita uma pequena alusão a este tipo de sistemas. Os sistemas DF tiveram o seu desenvolvimento a partir de modificações técnicas baseadas em motores que utilizavam HFO, devido a diferenças óbvias entre combustíveis. (Sentís, 2012)

Nos motores de DF, as características de ignição e de pressão de compressão de motores convencionais e a LNG, são combinadas. O combustível gasoso é pré-misturado com o ar comprimido sendo o processo semelhante aos motores diesel convencionais. No entanto, a mistura de combustível comprimido não entra em combustão devido ao maior atraso de ignição (*IDT-Ignition Delay Time*) que é característico de combustíveis de baixa reatividade como o metano. Assim, uma quantidade relativamente pequena de combustível de alta reatividade, por exemplo, gasóleo líquido, é injetado no cilindro do motor no final de um curso de compressão. O combustível de alta reatividade entra em combustão e liberta energia suficiente para inflamar a mistura de gás natural. Este mecanismo de ignição é frequentemente referido como ignição piloto a diesel.

Tipicamente, a quantidade de combustível piloto é muito pequena, suficiente para se alcançar uma ignição fiável.(Kahila et al., 2019)

Sistema de injeção de Gás

O sistema típico de injeção de motores *Dual-Fuel* consiste num conjunto de duas válvulas controladas eletronicamente para injeção de gás e o acionador de combustível (FIVA-*Fuel Injection Valve Actuator*) capaz de diferentes perfis de injeção. A Válvula FIVA auxilia o sistema piloto de combustível nesta mistura monitorizando constantemente as pressões de gás e de combustível da válvula de injeção para assegurar um tempo e desempenho corretos e verificando-se qualquer parâmetro anormal, injeção de gás desligar-se-á automaticamente e o motor passará para o modo de consumo de combustível. Este sistema de segurança também verifica a pressão do recetor de ar e pressão de combustão para detetar qualquer fuga de gás. Essa troca é feita automaticamente para os tubos de combustível, que serão purgados com gás inerte.(Sentís, 2012)

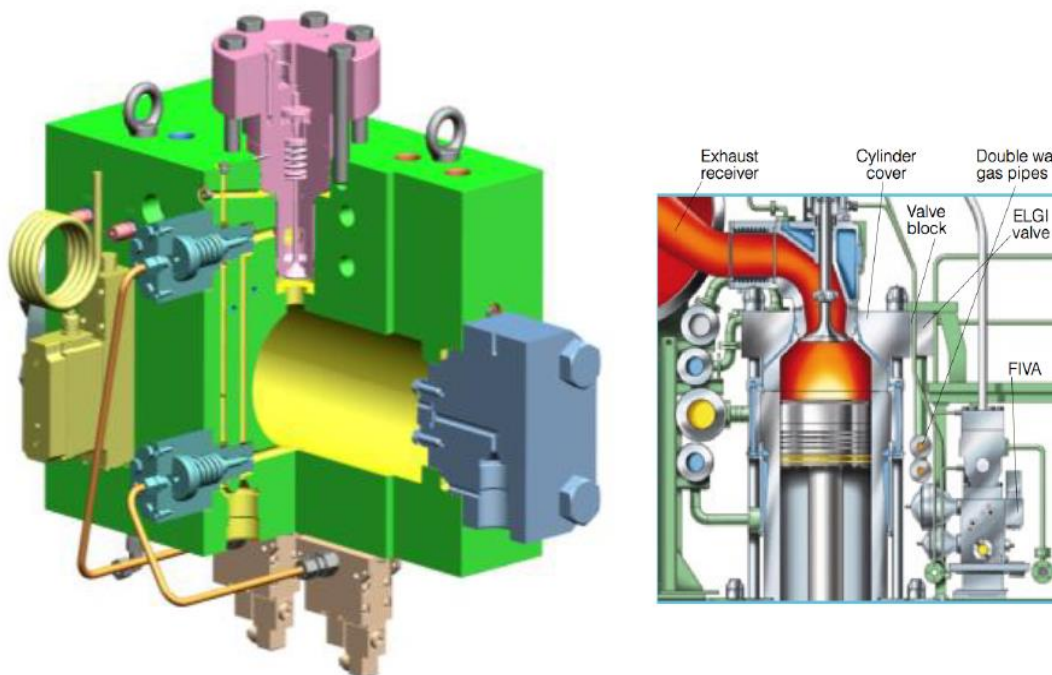


Figura 27-Secções do sistema de injeção nos motores *Dual-Fuel*(Sentís, 2012)

Injetor

A configuração da injeção de gás cumpre o princípio tradicional do design dos injetores compactos de combustível. A cobertura do cilindro tem um novo furo onde o gás é admitido. Para evitar fugas de gás entre o cilindro e as válvulas, o êmbolo tem de ser revestido por segmentos de vedação resistentes ao gás. Se alguma fuga acontecer, os sensores existentes na parede dupla das tubagens vão detetá-la. O óleo de controlo deve estar sempre a uma pressão mais alta (25-50 bar) do que a pressão do gás sendo o combustível injetado pelo injetor piloto. (Sentís, 2012)

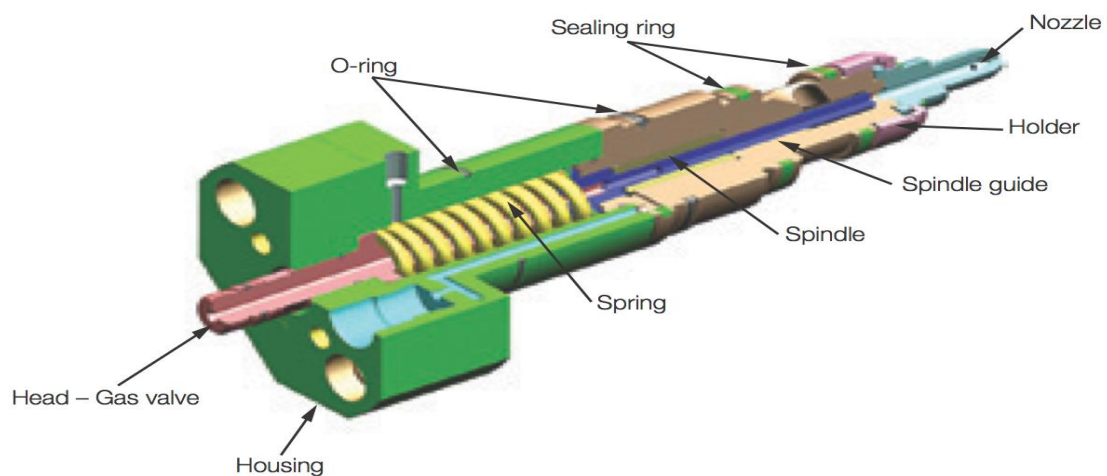


Figura 28-Secção do Injetor(Sentís, 2012)

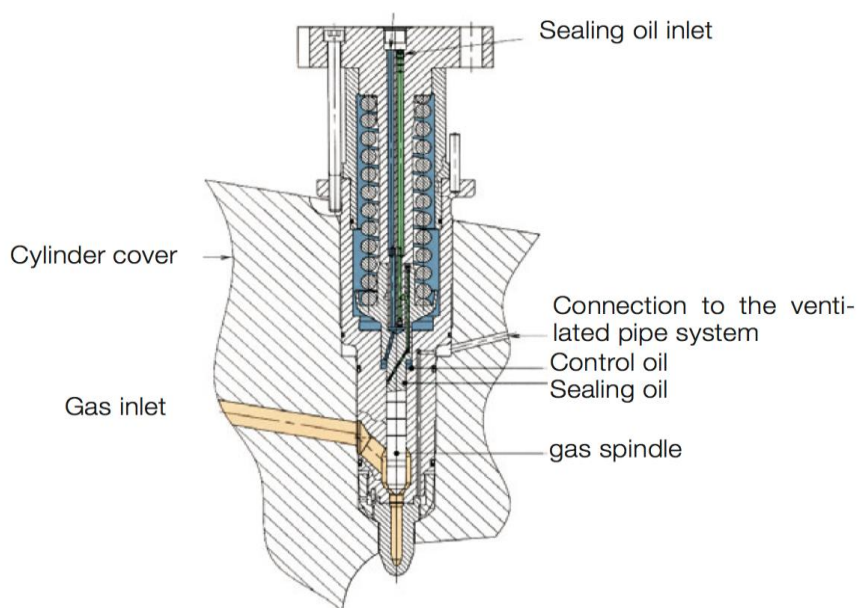


Figura 29-Esquema do Injetor(Sentís, 2012)

3.2.3. Navios *Diesel-Electric*

Os sistemas Diesel-Electric são um sistema de propulsão muito usado nos meios marítimos. Neste sistema, os motores diesel produzem energia a partir de um gerador que por sua vez transmitem essa energia aos veios por meio de um motor elétrico. Este tipo de sistemas podem ser empregues em submarinos e navios de superfície.

Existem casos, quando a carga auxiliar é apenas uma fração da carga necessária para a propulsão, as perdas associadas à conversão elétrica levam ao aumento do consumo de combustível nos sistemas de propulsão elétrica. O equipamento elétrico também leva a um aumento peso, tamanho e custo. Portanto, navios que operam frequentemente a baixa velocidade podem ser beneficiados se forem equipados por um sistema de propulsão híbrida. Na propulsão *Diesel-Electric*, o trabalho mecânico fornece a energia propulsiva necessária para altas velocidades a elevada eficiência. Adicionalmente, um motor elétrico, acoplado ao mesmo veio através de uma caixa redutora ou diretamente no veio do hélice é utilizado para baixas velocidades, evitando o funcionamento do motor principal ineficientemente com carga parcial. Este motor também pode ser usado como gerador para alimentar a rede elétrica dos navios. Um layout típico para um sistema de propulsão híbrida é apresentado na Figura 30.(Geertsma et al., 2017)

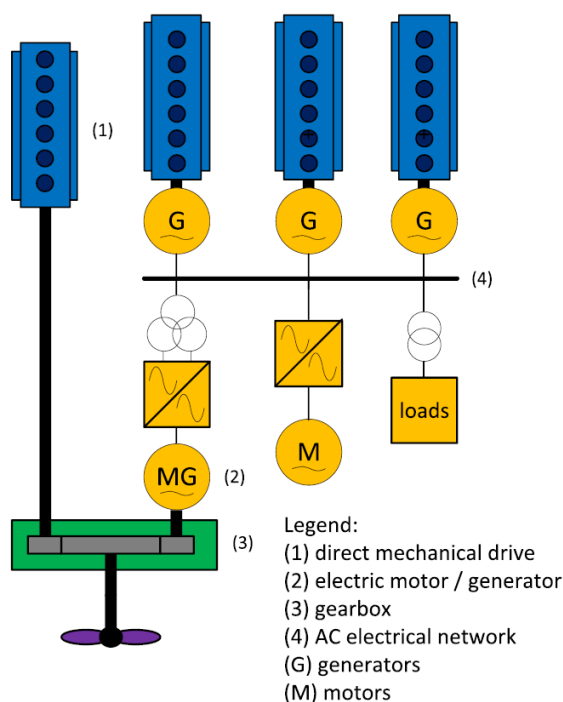


Figura 30-Sistema típico de propulsão *Diesel-Electric*(Geertsma et al., 2017)

Quando o gerador ou o grupo de geradores está a funcionar produz energia elétrica necessária para a locomoção do navio. Normalmente, o controlo é baseado em regras ou o operador determina a capacidade de geração.

As aplicações típicas de sistemas híbridos de propulsão encontram-se em fragatas e *destroyers*, rebocadores e embarcações offshore. Na Marinha dos Estado Unidos da América chegaram a conclusão que este tipo de sistema tinha muitos benefícios, sendo que, foi aplicado aos navios da classe de navios *DDG-51*.(Geertsma et al., 2017)



Figura 31- *USS ARLEIGH BURKE (DDG 51)*(Pages - default, n.d.)

A Marinha dos EUA usa turbinas a gás como o seu principal sistema de propulsão, também para os geradores dos navios.(Geertsma et al., 2017)

Controlo do Gerador de Veios

O motor elétrico pode funcionar como um gerador de veio, acoplado ao veio propulsor, desde que a máquina principal tenha potência disponível para o mesmo. Na fragata FREMM (*Frigate European Multi-Mission*) da Marinha Italiana a configuração da propulsão consiste na turbina a gás com auxílio de geradores diesel, que devido à energia produzida por esses geradores conseguem despor a potência máxima da propulsão disponível para qualquer velocidade para o veio.(Geertsma et al., 2017)



Figura 32-Classe de navios da Marinha Italiana, Bergamini FREMM(*Naval Analyses: Bergamini class (FREMM) frigates of the Italian Navy, n.d.*)

Portanto, uma margem de carga suficiente está sempre disponível, a menos que o navio esteja a navegar à velocidade máxima, em condições que não foram estabelecidas no seu projeto. Assim, a implementação no sistema elétrico de um gerador acoplado ao veio é viável para esta configuração, em que a estratégia de controlo aplicada ao conversor do gerador de veios se baseia no controlo da queda de velocidade e tensão. Além disso, a máquina elétrica do conversor usa um controlo orientado de campo, que é ajustado para a corrente fornecida pelo sistema de energia do conversor para manter a tensão DC. Estas estratégias combinadas aparentam ter sucesso no trabalho de um gerador de veio e de um gerador diesel em paralelo, contudo, devido ao uso do controlo de velocidade e tensão, a carga dinâmica é compartilhada igualmente entre o gerador de veio e o gerador diesel. Isto pode não ser o melhor uso possível para uma instalação a turbina a gás, pois a turbina a gás pode lidar com a carga dinâmica mais facilmente do que o gerador a diesel. (Geertsma et al., 2017)

Motor Elétrico

Quando o trabalho elétrico é projetado para funcionar em paralelo com o trabalho mecânico, pode ser usado para aumentar a velocidade máxima e reduzir a carga térmica do motor e, portanto, reduzir, por essa via, as emissões de NOx. Uma metodologia de

controlo consiste em utilizar o binário do motor elétrico de forma a reduzir o excesso de ar do motor principal a partir de uma relação, que indica a quantidade de ar disponível no cilindro do motor durante a combustão e, que constitui uma medida da carga térmica do motor. O método de controlo proposto aumenta o binário disponibilizado pelo gerador elétrico para manter o valor da relação acima indicada, que varia em função do binário, velocidade e pressão de compressão no motor. Durante uma manobra de aceleração simulada na Universidade Nacional de Atenas, esta estratégia alcançou uma redução de 16% nas emissões de NOx e um aumento de 0,25 do percentual de excesso de ar, assim reduzindo significativamente a carga térmica do motor durante manobras de aceleração. Portanto, a estratégia proposta demonstra claramente o potencial de melhoria de desempenho quando o trabalho da energia elétrica é usado em paralelo com o motor diesel principal.(Geertsma et al., 2017)

3.2.4. Navios de Propulsão Elétrica

A propulsão elétrica existe desde o início dos anos 1900. Na década de 1990, a propulsão elétrica recebeu um enorme impulso na indústria de navios de cruzeiro e nos navios capitais⁹, Figura 33. Uma arquitetura típica de um sistema de propulsão elétrica é representado na Figura 34. Múltiplos conjuntos de geradores diesel (1), uma rede elétrica de alta tensão de frequência fixa (2). Esta rede alimenta o motor de propulsão elétrica (5) e as cargas auxiliares (6), na maioria dos casos através de um transformador (3). O motor de propulsão elétrica é controlado em frequência (4) utilizado para controlar a velocidade da linha de veios e, portanto, a velocidade do navio.(Geertsma et al., 2017)



Figura 33- HNLMS Roterdão com propulsão elétrica (29)

⁹ Navios Capitais são os navios de uma marinha mais importantes, geralmente são os navios de maiores dimensões quando comparados a outros navios de guerra da sua respetiva frota.

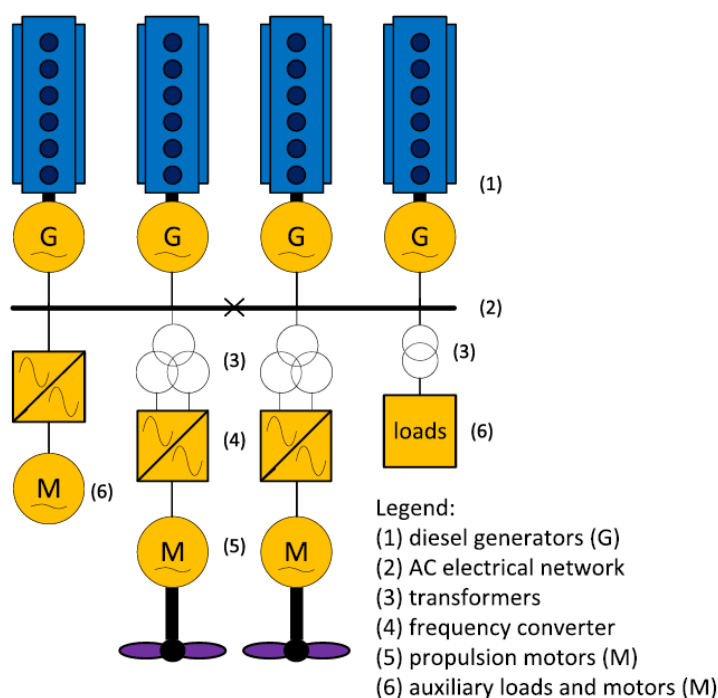


Figura 34-Sistema típico de propulsão elétrica(Geertsma et al., 2017)

Mesmo que a redução do consumo de combustível atribuído ao uso de meios elétricos seja anulada pelo aumento das perdas elétricas, a propulsão elétrica tem sido muito bem-sucedida na indústria de cruzeiros. Isto é atribuído principalmente à robustez e redundância dos sistemas elétricos, em que a falha de um gerador diesel quase não tem qualquer impacto na operação do navio. Além disso, a propulsão elétrica permite flexibilidade em espaços de máquinas, devido a uma diminuição do comprimento da linha de veios, que tradicionalmente determina o tradicional esquema da casa das máquinas. Devido ao seu sucesso na indústria de navios de cruzeiro, a propulsão elétrica foi igualmente aplicado em vários outros tipos de navios para desempenharem diferentes funções. A escolha da propulsão elétrica nestes navios é principalmente determinada pelos seus diversos perfis operacionais. Outra característica da propulsão elétrica, particularmente importante para os navios consiste na maior fiabilidade das instalações elétricas. Por exemplo, a existência de motores redundantes em reserva garante a disponibilidade de potência suficiente em caso de falha.(Geertsma et al., 2017)

No entanto, o funcionamento de motores extras causa uma carga parcial e, portanto, uma menor eficiência das máquinas térmicas afetas à geração de energia e aumento das emissões de NOx, como ilustrado na Figura 35.

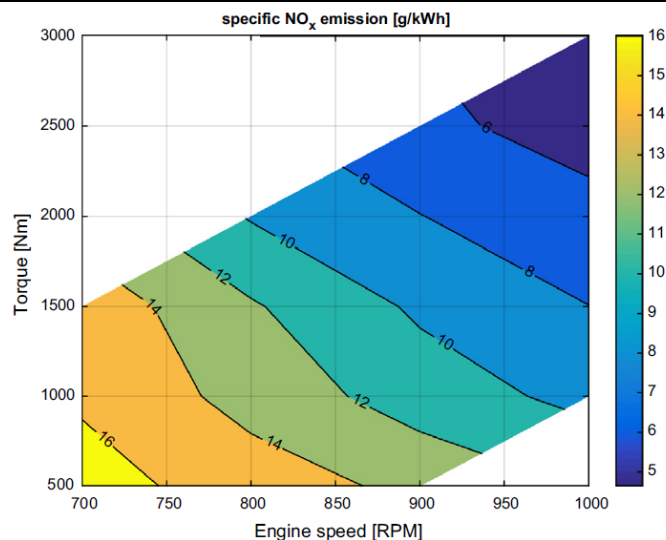


Figura 35- Resultados do estudo de emissões de NO_x(Geertsma et al., 2017)

Em determinadas aplicações, muito específicas, tais como a necessidade de assegurar uma capacidade de DP (Dynamic Positioning), a exigência de uma reserva de potência suficiente para manter o sistema em casa de falha tem um custo de investimento elevado. Para superar isto, a Wärtsilä oferece uma variante patenteada da arquitetura de um sistema de propulsão AC (*Alternate Current*) padrão como representado na Figura 36, em que os sistemas de barramento que complementam os dois conjuntos de geradores são isolados uns dos outros com um transformador de mudança de fase.(Geertsma et al., 2017)

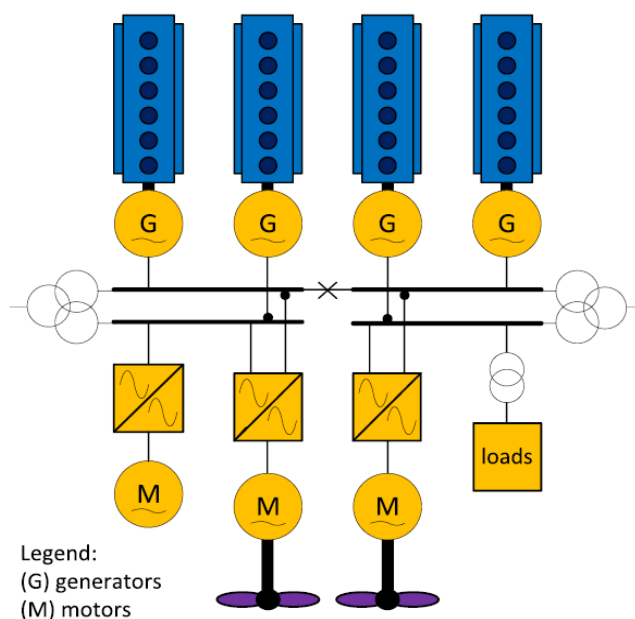


Figura 36- Esquema de propulsão elétrica com barramentos de fase separada(Geertsma et al., 2017)

Isto atenua a necessidade de transformadores de propulsão de mudança de fase (usado em unidades de propulsão convencionais) e reduz o impacto de uma falha do barramento para 25% da potência instalada em vez de 50%.(Geertsma et al., 2017)

O sucesso da propulsão elétrica em navios comerciais, que os tem levado para reduções do custo de funcionamento, levou a um desenvolvimento significativo de programas para permitir a propulsão elétrica em *contratorpedeiros* no Reino Unido e nos EUA. Estes programas de desenvolvimento foram direcionados para aumentar a densidade de tecnologias avançadas, contemplando novos motores de ímã permanente e o funcionamento dos sistemas a alta temperatura a fim de satisfazer requisitos militares permitir o uso da propulsão elétrica em navios de guerra, particularmente fragatas. e. Estes programas de desenvolvimento levaram à aplicação de propulsão elétrica nos contratorpedeiros Type 45 da Royal Navy e no Porta-Aviões *Queen Elizabeth*, e no *DDG-1000 da US Navy*. Apesar dos programas de desenvolvimento de tecnologias de um novo motor, estas aplicações navais ainda são todas baseadas no AIM (*Advanced Induction Motor*) com unidades de conversor de frequência PWM(*Pulse Width Modulation*) .(Geertsma et al., 2017)



Figura 37-Porta-Aviões *Queen Elizabeth*(British aircraft carrier *Queen Elizabeth* aborts sea trial after 'major leak', report says / *South China Morning Post*, n.d.)

Esta unidade AIM consiste num avanço da tecnologia de motores assíncronos. Estas aplicações navais consistem instalações em alta tensão e alta frequência, fixa, fornecidas por um gerador AC, de controlo convencional, apesar dos programas em desenvolvimento para novos projetos baseados em tecnologia de corrente DC. Podemos pois aplicar a tecnologia da propulsão elétrica a unidades navais, nomeadamente

representados pelo típico layout ilustrado na Figura 34. No entanto, os seus conversores podem ser ligados ao sistema de alimentação sem transformadores. (Geertsma et al., 2017)

Como já referido, o motor elétrico é o dispositivo mais utilizado para a conversão de energia elétrica em energia mecânica e é utilizado para propulsão clássica através de linha de veios e hélice, *thrusters*¹⁰ para propulsão e equipamentos auxiliares como guinchos, bombas, ventiladores, etc. Normalmente, 80-90% destes equipamentos dos navios, são acionados por motores elétricos. (Ådnanes, 2003)

Os motores elétricos mais utilizados são:

- Motor DC

O motor DC (*Direct Current*) deve ser alimentado por uma fonte DC e, desde o sistema de geração e distribuição de energia normalmente é um sistema trifásico, isso significa que um motor DC deve ser alimentado a partir de um retificador.

- Motores assíncronos (indução).

O motor assíncrono ou indução é dos principais motores produzidos pela indústria. O seu design robusto e simples garante na maioria dos casos uma longa duração com um mínimo de avarias e manutenções. O motor assíncrono é utilizado em quaisquer aplicações, quer como motor de velocidade constante diretamente ligado à rede, quer como um motor de velocidade variável alimentado a partir de um conversor de frequência estática.

- Motores síncronos

A máquina síncrona normalmente é utilizada em grandes unidades de propulsão, tipicamente superiores a 5MW, diretamente ligados ao veio da hélice, ou superiores a 8-10MW com uma ligação a caixa redutora. Para potências inferiores a esta, o motor assíncrono é normalmente competitivo em termos de custos. O design de um motor síncrono é semelhante ao de um gerador síncrono. Normalmente não é usado sem um conversor de frequência para controlo de velocidade variável nas aplicações navais.

¹⁰ Thrusters é um dispositivo de propulsão usado em embarcações.

- Motores síncronos com íman permanente

Motores síncronos de íman permanente são usados em unidades industriais. Nos últimos anos, foi também introduzido em grandes aplicações de energia, em várias unidades de propulsão da ordem dos MW de potência, e nas s nas Marinhas de Guerra, e recentemente em POD *podded propulsor*¹¹. O benefício deste tipo de propulsores consiste na sua elevada eficiência e design compacto, tornando-o especialmente interessante para instalações onde as dimensões devem ser o mais pequenas possível. O arrefecimento direto da água, eliminando a necessidade de circuitos de arrefecimento para o motor e a simplificação dos trabalhos de construção e instalação, são outras vantagens importantes.

3.2.5. Navios com Sistemas de Propulsão a Hidrogénio

O hidrogénio (H₂) difere de outros combustíveis na medida em que pode ser produzido e utilizado sem libertar gases de efeito de estufa como o CO₂.

H₂ é um elemento a considerar em futuros sistemas energéticos devido ao facto de não ser poluente. O hidrogénio pode ser obtido com o recurso a energias renováveis e pode torna-se num elo crucial num ciclo renovável global de energia. (Ådnanes, 2003)

As propriedades físicas e químicas do hidrogénio tornam a sua utilização mais vantajosa do que a dos combustíveis fósseis. O hidrogénio é uma molécula simples e não tóxica que gera energia de forma limpa e eficiente, mesmo silenciosamente e sem combustão. O uso generalizado de H₂ tem sido um desafio, devido à sua baixa densidade de energia em relação aos combustíveis convencionais (hidrocarbonetos). A densidade de energia tem, fundamentalmente, implicações na viabilidade do transporte movido a H₂, sendo necessário algum capital, materiais, volume e energia necessários para o armazenamento a bordo. (Ådnanes, 2003)

Devido aos altos custos que atinge este tipo de sistema, torna-se necessário estabelecer estratégias de forma a alcançar benefícios a partir da utilização deste tipo de sistema, tanto a nível de desenvolvimento de tecnologia como infraestruturas de reabastecimento de H₂ para a utilização a bordo. Consequentemente, com estas melhorias na tecnologia, o armazenamento de hidrogénio a bordo poderá tornar-se mais viável, de

¹¹ *Podded* é um dispositivo de propulsão ou manobra, que é externo ao casco do navio e tem a capacidade de alimentação dos hélices.

forma a ser um combustível de interesse para sistemas de transporte.(Ådnanes, 2003)

Ao contrário dos combustíveis de hidrocarbonetos poliatômicos, como a gasolina (C₈H₁₈), o H₂ consiste em apenas dois átomos monovalentes. Essa estrutura exclusiva fornece características extremas de combustão ao H₂, por exemplo, baixa energia de ignição, baixa emissividade, amplos limites de inflamabilidade, alta velocidade da chama e propriedades, tais como, alta difusividade, condutividade térmica, fluuabilidade e incompressibilidade. O ponto de ebulição extremamente baixo (20,3 K), perdendo apenas para o hélio, confere ao LH₂ (hidrogénio líquido) um grande coeficiente de expansão térmica. O LH₂ expande mais de 30% entre 20 K e 30 K.(Ådnanes, 2003)

Particularmente impressionante é a densidade atômica muito baixa do H₂, tanto como gás comprimido quanto líquido criogénico. Existem menos átomos de hidrogénio no LH₂ (em volume) do que nos hidretos de metal, a maioria dos combustíveis líquidos moleculares comuns, como octano (C₈H₁₈), etanol (CH₃CH₂OH), metanol (CH₃OH), metano líquido criogénico (LCH₄), amónia (NH₃), hidrazina (N₂H₄), peróxido de hidrogénio (H₂O₂) e até H₂O. (Ådnanes, 2003)

A redução de emissões nas embarcações modernas é uma questão importante como já vem sendo referido. O uso de *Fuel Cells* como fonte de energia resolve esse problema, mas levanta outras preocupações. Essas preocupações têm a ver com o projeto do navio, a fim de resolver problemas tecnológicos dos sistemas, sistemas de armazenamento e distribuição de hidrogénio e baterias de *Fuel Cells*. A redução das emissões de gases de evacuação, melhoria da eficiência térmica, baixando os níveis de ruído e vibração são os principais objetivos de projetar e exploração dos sistemas navais modernos.(Georgescu & Mamut, 2004)

Geralmente, uma *Fuel Cell* é uma estrutura dividida e consiste numa bateria de *Fuel Cells* individuais. Cada célula tem um ânodo e um cátodo, separados por uma camada cerâmica onde é colocado um eletrólito específico. Um catalisador é colocado no ânodo para a reação ser realizada mais rapidamente. A corrente direta produzida é proporcional à extensão da reação eletroquímica de acordo com a lei Faraday¹².(Georgescu & Mamut, 2004)

¹² A lei de Faraday ou lei da Indução Eletromagnética relaciona a força eletromotriz ε gerada entre dois terminais de um condutor sujeito à variação de fluxo magnético Φ [Wb], com o módulo da variação do fluxo em função de um intervalo de tempo em que esta variação acontece.

Os motores elétricos determinam a potência máxima e o binário de tração, desde que o sistema de *Fuel Cells* e armazenamento sejam capazes de fornecer esta energia. O gás hidrogénio deve ser comprimido a uma pressão extremamente alta de 5.000 a 10.000 psi para permitir um armazenamento de combustível suficiente para obter uma autonomia adequada. O funcionamento de uma *Fuel Cell* consiste em duas reações catalíticas. O hidrogénio no ânodo é decomposto por um catalisador em protões, com carga positiva, e eletrões com carga negativa. Os eletrões passam na corrente elétrica, e os protões deslocam-se através do eletrólito para o cátodo. No cátodo os protões ligam-se cataliticamente com o oxigénio e com os eletrões que provêm da corrente elétrica, este processo está exemplificado na Figura 38.(Yade et al., 2014)

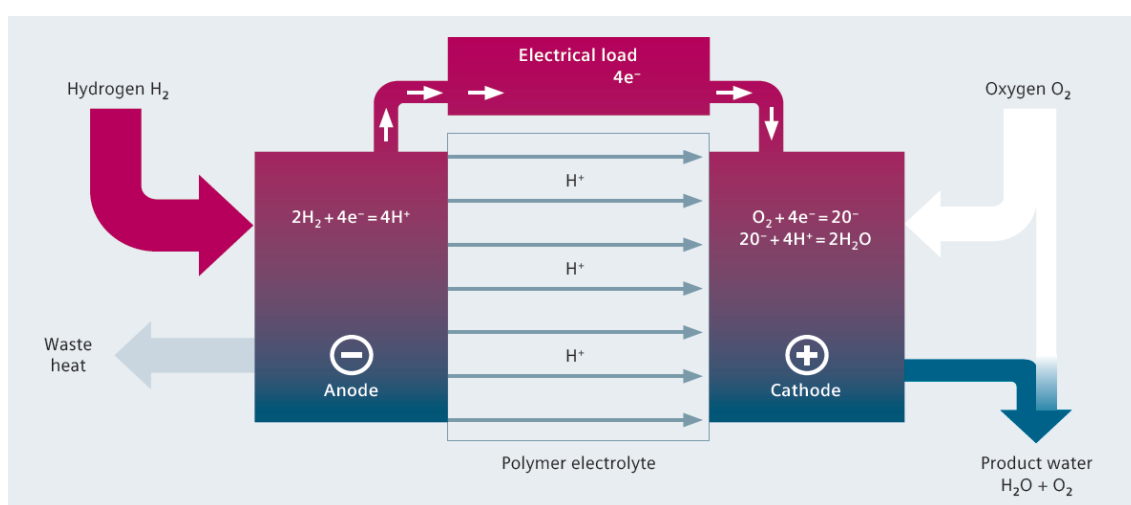


Figura 38-Princípio Funcional de uma *Fuel Cell*(Siemens AG, 2009)

Uma das suas aplicações é nos submarinos, nomeadamente os Submarinos da Classe 212A (seis na Marinha Alemã e quatro na Marinha Italiana) que estão equipados com módulos FCM 34 desenvolvidas a partir de 1984 a pedido do Ministério da Defesa alemão.(Siemens AG, 2009)

Os Submarinos da Classe 214 – operados pela Marinha da Grécia, Marinha da República da Coreia, Marinha Portuguesa, e no futuro a Marinha turca - estão equipados com módulos FCM 120, que foram desenvolvidos numa fase posterior. Os Submarinos operacionais da Classe 209 podem ser atualizados com uma central adicional de *Fuel Cells* durante readaptação modernização de meia vida (MLU), e assim adquirir os benefícios da *Air-Independent Propulsion* (AIP) a um preço muito mais baixo do que o necessário para adquirir um novo submarino AIP. A impressionante vantagem da Tecnologia AIP, que se baseia em *Fuel Cells*, foi demonstrada a bordo de submarinos de

classes 212A, 214, e *Dolphin* AIP. Esse sistema equipa os submarinos da Marinha Portuguesa da classe Tridente.(Siemens AG, 2009)



Figura 39-NRP Tridente(Submarino Tridente em reparação no Alfeite / Cibersul, n.d.)

As condições de funcionamento adequadas para os módulos de *Fuel Cell* são bastante benéficas para aplicações submarinas a nível operacional.

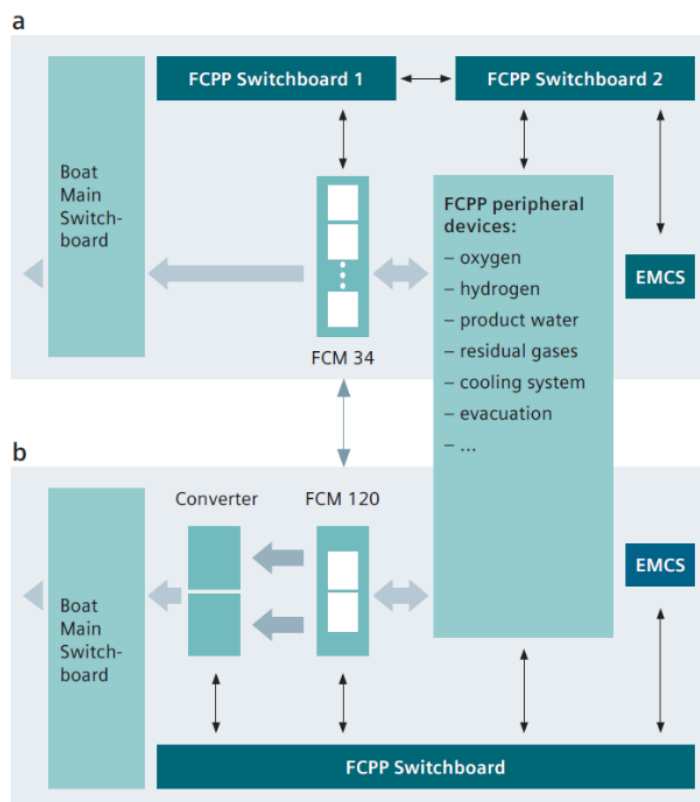


Figura 40-a)Bateria de *Fuel Cell* com FCM 34, acoplamento direto da tensão à rede nos submarinos da classe 212A
b)Bateria de *Fuel Cell* com FCM 120; acoplamento via conversor nos submarinos da classe 214(Siemens AG, 2009)

Os sistemas de hidrogênio de *Fuel Cell* são os únicos meios que não emitem gases nocivos para o meio ambiente, a água é o único produto e nenhum processo de combustão

está envolvido na operação das *Fuel Cells*. Teoricamente, o processamento da gasolina, metanol e outros combustíveis carbonosos, com gases ricos em hidrogénio adequados para uso em *Fuel Cells* também poderia ser feito sem a formação de poluentes, sendo a água e o CO₂ os únicos produtos de reação. Na prática, a operação do processador de combustível e do sistema de *Fuel Cell* envolve processos de combustão auxiliar e, portanto, existe o potencial para a formação de NO_x e produtos de combustão incompleta, como o CO e gases ou vapores carbonosos. Entretanto, sob as condições e restrições químicas prevaletentes no funcionamento adequado das *Fuel Cells* que funcionam a metanol e gasolina, essas emissões devem ser próximas de zero para NO_x e extremamente baixas para poluentes carbonosos, incluindo CO. (Mokale & Prabhujgaonkar, n.d.)

3.2.6. Tecnologias para Diminuir as Emissões

3.2.6.1. Sistema *Scrubber*

O sistema *Scrubber* é uma tecnologia de pós-tratamento para reduzir as emissões de SO_x. Existem dois tipos de tecnologia de *scrubbers*, *wet* e *dry*, e o princípio químico é o mesmo nos dois sistemas, que é a “lavagem” dos gases de evacuação antes de serem libertados para a atmosfera. (Sentís, 2012)

***Wet Scrubber* de SO_x**

Wet scrubbing necessita de, pelo menos, dos seguintes componentes:

- Unidade *Scrubber*: componente principal, que traz água que entra em contacto com os gases de evacuação, geralmente, disposto no sistema de evacuação numa posição elevada e ao redor das respetivas condutas;
- Estação de tratamento para o condicionamento da água tratada antes da descarga ao mar;
- Depósito de lamas para resíduos separados da água de tratamento;
- Sistema de controlo e monitorização de emissões;
- Bombas auxiliares, encanamentos, refrigeradores e tanques que são necessários ao sistema;
- Algumas instalações podem precisar de um *Reheater* para aumentar a temperatura dos gases de evacuação acima do ponto de orvalho e/ou um meio para remover gotículas de água.

O *Wet Scrubber* não pode originar uma contra-pressão de combustão superior à estabelecida pelo fabricante da unidade em que foi feita a certificação dos limites de emissões de NO_x do motor. Uma avaliação correta do *Scrubber* é recomendada a fim de permitir um projeto otimizado, com eventual seleção de um equipamento menor, reduzindo o espaço necessário para a instalação do sistema, os custos do fabricante, modificações no navio e as estruturas necessárias associadas. (Sentís, 2012)

Dry Scrubber de SO_x

Dry scrubbing necessita dos seguintes componentes principais:

- Unidade *Scrubber*: componente principal, em que o gás de evacuação entra em contato com os pequenos grãos de hidróxido de cálcio. Devido às características do *Scrubber* de reação pode ser situado antes de qualquer recuperação de calor residual ou equipamento SCR porque a reação liberta calor.
- Silo de alimentação dos grãos e um transportador para realizar uma descarga posicionada na parte superior e parte inferior do *Scrubber*, respetivamente.
- Sistema de controlo e monitorização de emissões capaz de ajustar o fluxo correto dos grãos através do *Scrubber*.
- Sistema pneumático com encanamentos flexíveis para transportar grãos e para fazer o respetivo regresso e armazenamento a bordo.
- Os grãos são esferas de hidróxido de cálcio com um tamanho entre 2 e 8 mm de diâmetro. (Sentís, 2012)

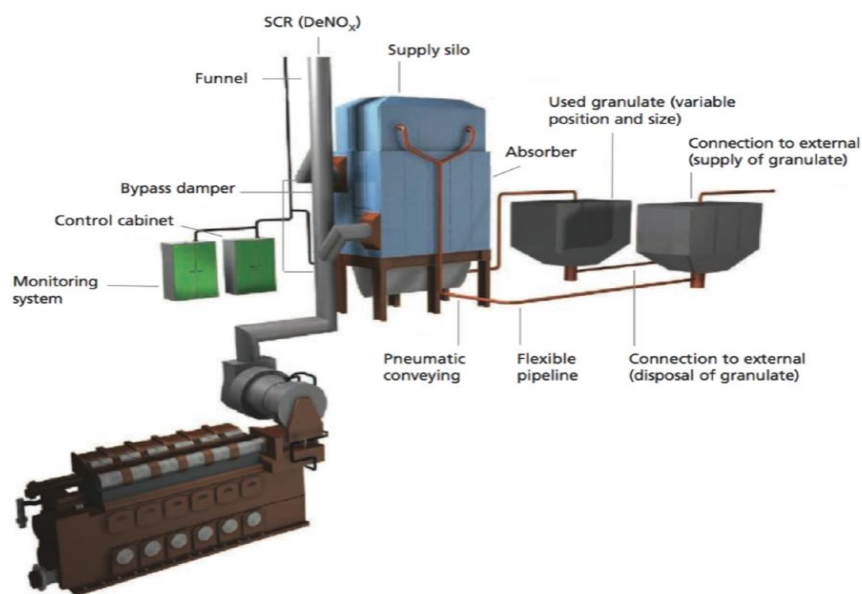
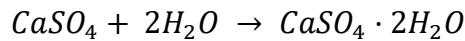
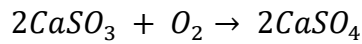
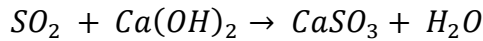


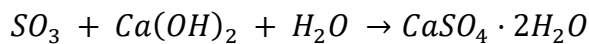
Figura 41-Dry Scrubber com sistema de grãos(Sentís, 2012)

O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reage com óxidos de enxofre para formar gesso da seguinte maneira:

Para SO_2 :



Para SO_3 :



O consumo típico de grãos verifica-se a uma taxa de 40 kg/MWh para uma densidade dos grãos de 800 kg/m³, por outras palavras, 0,05 m³/MWh. O consumo de energia elétrica é menor do que em sistemas de *Wet Scrubbers* sendo que 0,15-0,20% da potência total é absorvida pelo sistema. Os grãos devem ser armazenados antes e após o uso em compartimentos separados especiais. (Sentís, 2012)

Circuito Aberto de água salgada

Nesse tipo de Scrubbers, a água do mar que já depurou os gases de evacuação, será instalado um sistema de tratamento da água, onde os materiais são libertados para tanques especiais, que são descarregados no porto e o restante da água é misturada com água doce para ajustar o pH antes de ser libertada no mar. (López, 2015)

Este sistema utiliza uma média de água de mar de 45 m³/MWh de potência instalada. A separação do SO_x é igual a 98%, porque este sistema pode ser usado para consumir combustível com um teor de 3,5% de enxofre e obter emissões equivalentes a um combustível com um teor de 0,1% de enxofre. Para definir um nível de 0,5% de enxofre, o sistema regula o volume de água utilizado. (López, 2015)

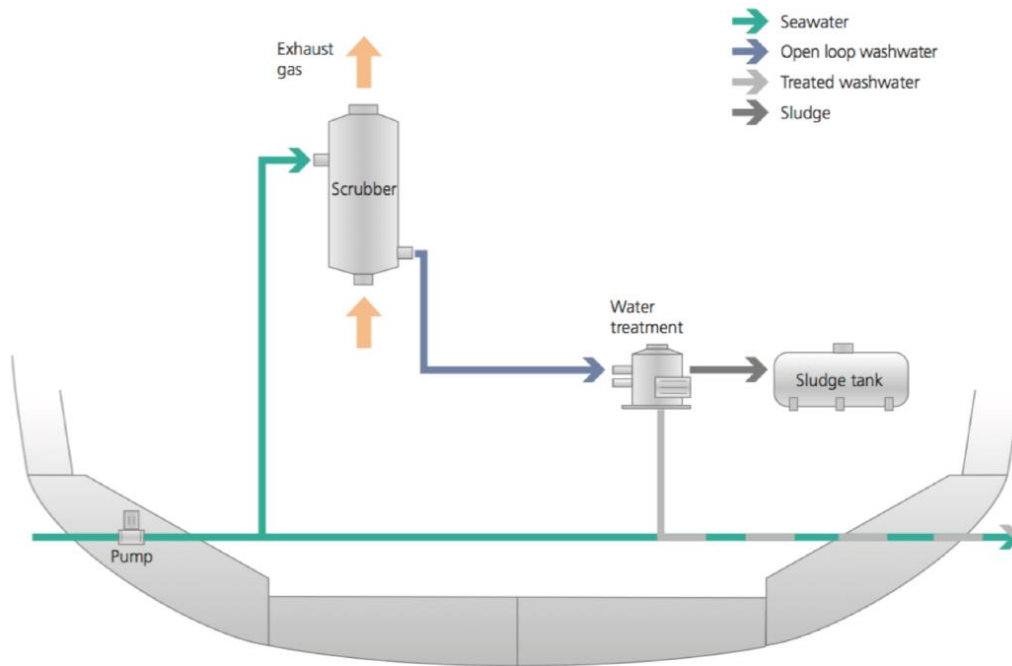
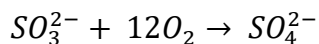
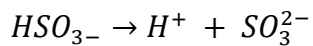
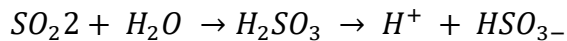


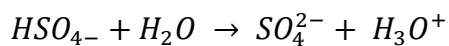
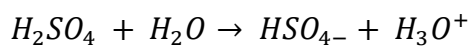
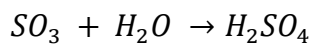
Figura 42-Esquema de um *Scrubber* de Circuito Aberto (Sentís, 2012)

As reações que ocorrem neste *Scrubber* são as seguintes:

Para SO₂:



Para SO₃:



Este sistema é baseado na alcalinidade da água. As áreas de água com baixa alcalinidade situam-se, por exemplo, no Báltico. A sua eficácia varia também com a temperatura da água, aumentando com esta. Existem estudos da associação “Exhaust Gas Cleaning System Association”, que demonstram que a acidez da água é neutralizada rapidamente pela água do mar. A principal argumentação é a de que não há nenhum

problema nos portos ao usar este sistema e com o tempo vai ser cada vez mais usado em águas quentes, ricas em vida marinha.(López, 2015)

Circuito Fechado de água doce

Este sistema utiliza uma solução alcalina produzida a partir da adição de água doce com soda cáustica NaOH. Esta solução alcalina é uma espécie de inibição dos componentes do SO_x dos gases de evacuação. Como podemos ver no esquema da Figura 43, esta solução depois de passar pelo sistema, ao contrário do que acontece no circuito, é levado para um tanque onde se mistura com água doce e volta-se a misturar a solução com NaOH para voltar a ser pulverizado sobre os gases de evacuação. O processo de tratamento requer que uma parte da solução alcalina não possa ser reutilizada, pelo que é levada para um tanque especial designado por *holding tank* que depois é despejado nos portos. Por outro lado, esta quantidade é apenas 1% do volume circulado, muito menor do que o circuito aberto. Os sedimentos complexos que incluem o tanque de lodo são descarregados nos portos. O inconveniente deste sistema é que é necessário uma unidade de transformação de soda cáustica, que é tratada a temperatura controlada.(López, 2015)

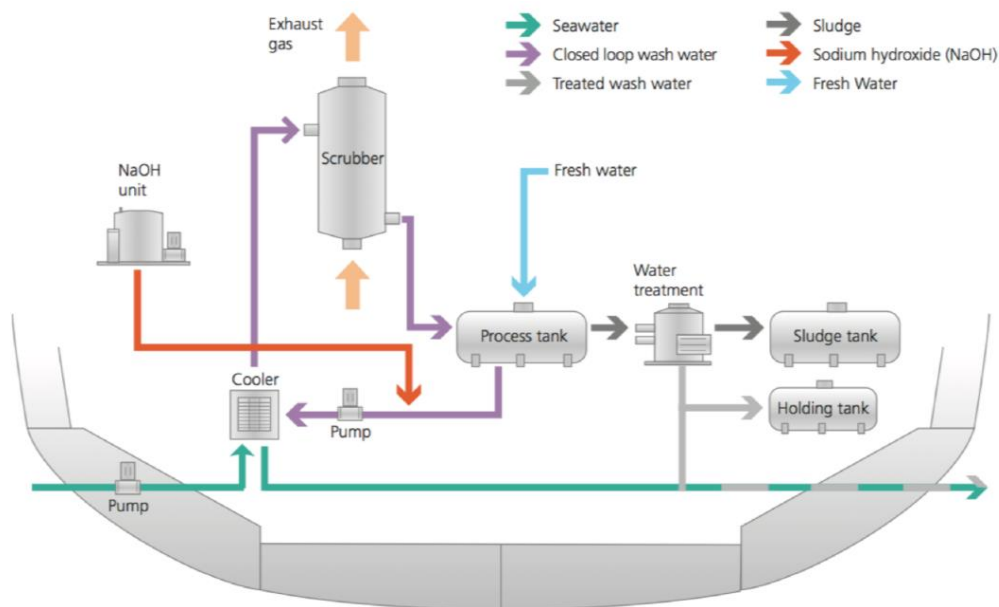
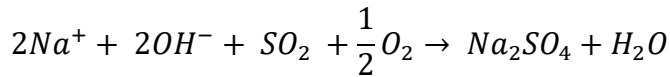
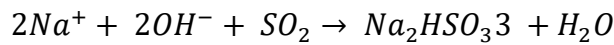
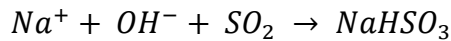


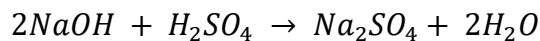
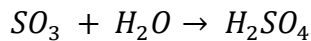
Figura 43-Esquema de um Scrubber de circuito fechado(Sentís, 2012)

As reações que acontecem neste tipo de *Scrubber* são:

Para SO₂:



Para SO₃:



Como já foi referido anteriormente, a água do sistema de água doce é introduzida no sistema do *Scrubber* através do tanque de processo. Uma bomba comprime a água para a unidade de NaOH antes de a arrefecer num permutador de calor arrefecido por água do mar. Quando a água estiver pronta, será introduzida no *Scrubber* aproximadamente a uma taxa de 20 m³/MWh. A taxa de descarga para a unidade de tratamento de água é de aproximadamente 0,1 m³/MWh para manter a água que foi tratada em perfeitas condições. O consumo de NaOH é de cerca de 15 l/MWh. O nível da água tratada é reduzida pela evaporação do *Scrubber*, mas para reduzir o consumo de água doce é possível instalar um sistema de recolha da água tratada para haver uma reutilização. A água da unidade de tratamento separa lamas e água do mar para evitar a contaminação para o mar usando separadores centrífugos ou separadores *multi-stage oily*.(Sentís, 2012)

Ciclo Híbrido

Este sistema permite um funcionamento flexível que possa operar segundo o circuito aberto e fechado. A vantagem é precisamente o poder de operar no circuito fechado em que não se fazem descargas de água ou por razões de baixa alcalinidade baixa ou por não terem qualidade adequada aos regulamentos em vigor nos locais onde deveria ser descarregada. O inconveniente é o seu maior custo e a existência de um maior número de equipamentos a bordo. Na Figura 44 e 45, é apresentado o esquema do diagrama de processo de um *Scrubber* híbrido a operar tanto no circuito aberto como no fechado.(López, 2015)

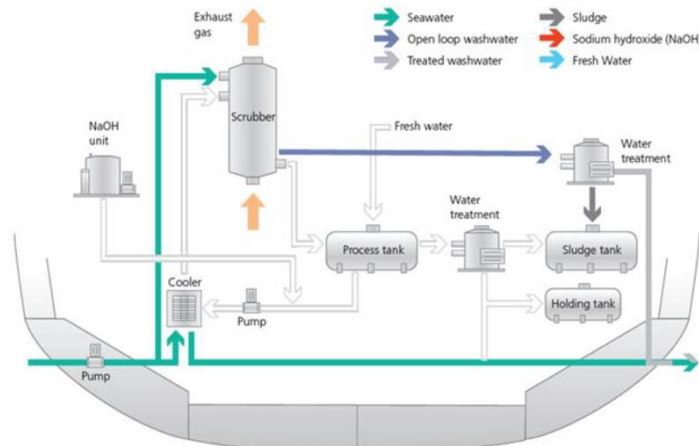


Figura 44-Scrubber em circuito aberto(López, 2015)

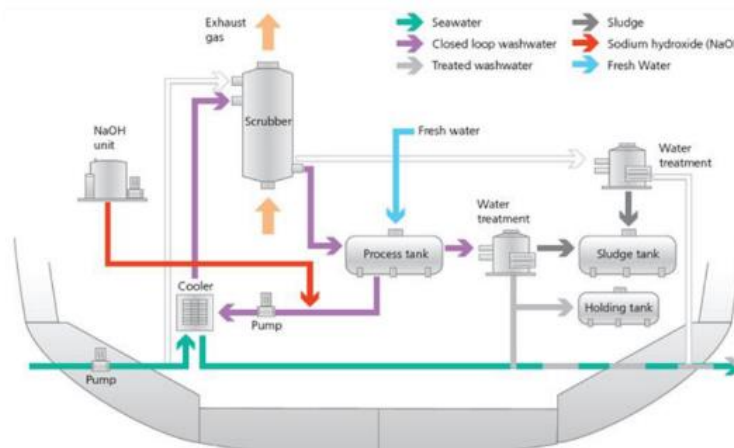
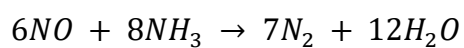
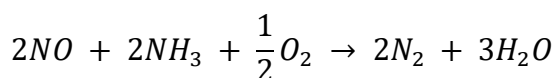
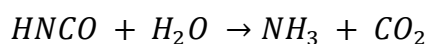
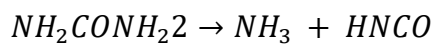


Figura 45-Scrubber em circuito fechado(López, 2015)

3.2.6.2. Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)

As emissões de NOx provenientes da combustão são convertidas em azoto e água, injetando um reagente químico à base de azoto, mais conhecida como ureia (NH₂CONH₂) ou amoníaco (NH₃). As reações químicas, de forma simplificada, são as seguintes:



A maior redução de NO_x é alcançada a temperaturas entre 870 e 1.200°C, o reagente deve ser introduzido antes de arrefecer os gases de evacuação. A eficiência da remoção é de 30%-40%. No caso do SNCR o uso de amoníaco pode ser uma questão mais importante do que para o SCR.(Sentís, 2012)

3.2.6.3. *Selective Catalytic Reduction (SCR)*

O SCR é semelhante ao SNCR na medida em que utiliza a injeção de amoníaco nos gases provenientes da combustão para converter as emissões de NO_x em azoto elementar e água. A diferença-chave entre o SCR e o SNCR é a presença em sistemas SCR de um catalisador, que acelera as reações químicas. O catalisador é necessário porque os sistemas SCR operam a temperaturas muito mais baixas quando comparados com o sistema SNCR. As temperaturas típicas para SCR são de 340°C a 380°C, em comparação com os 870°C a 1.200°C para o SNCR. A superfície ativa do catalisador é tipicamente reforçada em metal, cerâmica ou fibra. Os catalisadores são geralmente feitos de óxidos metálicos pesados, constituídos pelo material base TiO₂ (Dióxido de Titânio) e componentes ativos de vanádio, tungstênio, molibdênio, cobre e crómio. Como estes catalisadores não são quimicamente modificados no processo, a sua vida útil é geralmente muito longa e a sua mudança só é necessária após 4 a 6 anos de utilização. O processo de mudança geralmente envolve a remoção de partículas sólidas nos catalisadores por aspirador, lavagem dos catalisadores em banhos ácidos e a secagem dos catalisadores lavados. As partículas sólidas removidas geralmente consistem em partículas de cinza e, portanto, podem ser eliminadas de forma semelhante.(Sentís, 2012)

O processo SCR é uma tecnologia de controlo de NO_x de pós-combustão que remove o NO_x dos gases de evacuação. Quando os gases de evacuação passam pelo catalisador SCR, o NO_x dos gases reage com amoníaco (um reagente) e é reduzido a N₂ e vapor de água.(Sentís, 2012)

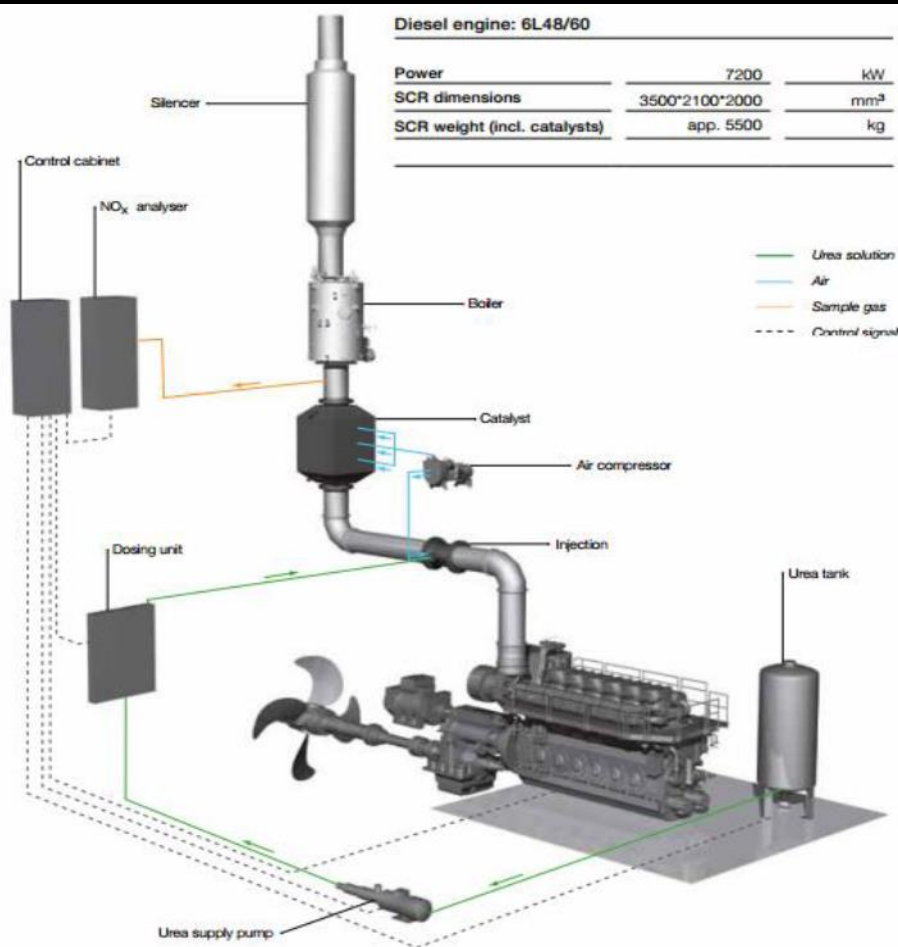


Figura 46-Esquema de um sistema SCR(López, 2015)

O gás de amoníaco será gerado a partir de ureia para sistema de conversão de amoníaco: quando a ureia reage com água sob um ambiente aquecido, hidrolisa o amoníaco, decompondo-se em dióxido de carbono (CO₂), azoto (N₂) e água (H₂O). A eficiência típica de remoção de NO_x do SCR é de 90%-99%. Quando comparado com o SNCR, há um ligeiro aumento no consumo de energia auxiliar, enquanto a presença de amoníaco pode ser mais facilmente controlada dentro do limite aceitável devido à presença de catalisadores.(Sentís, 2012)(López, 2015)

No entanto, o funcionamento deste equipamento aumenta o consumo de combustível e as emissões de CO₂. Esta tecnologia pode ser usada em navios novos e já construídos. O seu principal inconveniente é o aumento do consumo e o perigo de corrosão causado pelo amoníaco nas condutas de evacuação. A utilização de SCR é amplamente conhecida, mas a sua utilização com a combinação com um sistema de *Scrubber* ainda não é utilizada. (Sentís, 2012)(López, 2015)

3.2.6.4. Exhaust Gas Recirculation (EGR)

O sistema EGR é uma tecnologia que já é bastante utilizada no campo automóvel, mas que se começa a desenvolver nos meios marítimos. Alimenta o turbocompressor com os gases de evacuação e volta a reintroduzir nos cilindros. Isto reduz o teor de oxigénio e aumenta o calor resultante a partir duma redução das temperaturas de combustão máxima e, portanto, a formação de NOx é diminuída. Os primeiros testes nos motores diesel marítimos (MGO ou HFO) utilizando o sistema EGR mostraram um aumento das emissões de partículas (PM), acidificação do óleo e a redução do desempenho do motor. (Sentís, 2012)

A solução para a acidificação consiste em usar um *Scrubber* para limpar pelo menos 80% do enxofre nos gases de evacuação antes de se purgar o turbocompressor. O desempenho do motor pode ser melhorado se não for utilizado um sistema EGR, ajustando parâmetros do processo de injeção e combustão. Sobre a emissão de PM apenas técnicas de filtragem podem ser aplicadas para evitar que este seja libertado para a atmosfera. Sistemas EGR de primeira geração com um sistema *Scrubber* integrado podem eliminar cerca de 80% do enxofre que poderia libertado e cerca de 85% de NOx. (Sentís, 2012)

Na Figura 47, podemos observar os principais componentes de um sistema EGR. Um purificador situado antes do turbocompressor, para reduzir o SOx antes da parte dos gases reciclados na câmara de combustão. Um sistema que reduz a temperatura dos gases reciclados e, por último, um meio que aumenta a presença dos gases antes de reciclados. (López, 2015)

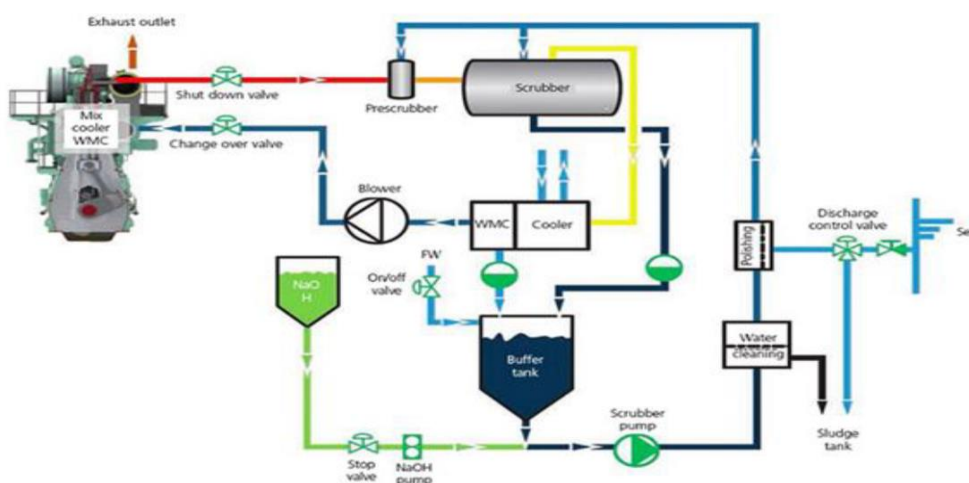


Figura 47-Esquema de um sistema EGR(López, 2015)

Os futuros motores vão poder integrar o sistema EGR, ajustando-o da mesma maneira que, por exemplo, um *intercooler*. A próxima ilustração mostra um primeiro conceito das partes do EGR a amarelo.(Sentís, 2012)



Figura 48-Sistema EGR de segunda geração integrado no motor(Sentís, 2012)

3.2.6.5. Combustíveis com baixo teor de enxofre

Para cumprir a regulamentação das emissões de SO_x, consiste em usar combustíveis que contenham uma quantidade muito baixa de enxofre. Este tipo de combustível custa aproximadamente 50% a mais, no entanto, simplifica a possibilidade de navegar nas ECA pois os navios que sejam a MGO e outros a HFO não necessitam grandes modificações no motor ou modificações no sistema de gases de evacuação, necessitando apenas de colocar um *Scrubber*.(Sentís, 2012)

É a maneira mais fácil de realizar o controlo de enxofre nas ECA e, provavelmente, ajustando o motor dos navios também se poderia realizar a regulação de emissões de NO_x. Porém, devido a mudanças na viscosidade, propriedades do lubrificante e diferenças de pH (mais ácido) do MGO, alguns motores (normalmente os mais antigos) não podem utilizar este tipo de combustível, portanto, nesses casos, esses navios deve tomar outras opções para atender aos requisitos das ECA. (Sentís, 2012)

4. Análise Comparativa

Como sabemos, a partir de 1 de janeiro de 2015, ao abrigo do novo regulamento do anexo VI da convenção MARPOL, todos os navios que navegam nas ECA devem consumir um combustível com um teor de enxofre inferior a 0,1%. O marco que está a ocorrer desde 1 de janeiro de 2020, em que a IMO decidiu alargar a sua entrada em vigor, todos os navios devem consumir um combustível com um teor de enxofre inferior a 0,5%, fora das ECA.(López, 2015)

As alternativas referidas anteriormente estão a revolucionar a indústria marítima que têm tido vários desafios, desde a transição dos primórdios do consumo de carvão para a locomoção, até aos combustíveis líquidos. Embora estejam a ser investigados novos tipos de combustíveis, ainda não houve grandes desenvolvimentos neste campo, sendo que os únicos dois combustíveis fósseis regulados são o diesel marítimo (MGO) e o LNG, que pela sua própria composição carece de enxofre.(López, 2015)

Para atenuar as emissões provenientes da combustão dos combustíveis foi necessário desenvolver novos sistemas e meios tecnológicos de forma a diminuir essas mesmas emissões que são nocivas para o ambiente e para a saúde. A utilização de sistemas de *Scrubbers* requer investimentos iniciais significativos, em geral, menos do que o necessário para a utilização de sistemas LNG como combustível.(López, 2015)

As opções de conformidade associadas às passagens nas ECA para novos navios incluem a utilização de sistemas de controlo de gases de evacuação (por exemplo o SCR), a alteração dos combustíveis para o diesel marítimo (MGO) ou gás natural liquefeito (LNG), ou a instalação de controlos do sistema base do motor (por exemplo, o EGR). Outras tecnologias (por exemplo, biocombustíveis e injeção de água) também estão em desenvolvimento, mas ainda não atingiram a adoção em larga escala.(US Energy Information Administration, 2015)

Para avaliar quais das alternativas já referidas é a mais adequada, é necessário analisar aspetos como as áreas de navegação da embarcação, a sua idade, bem como os custos fixos e operacionais específicos de cada alternativa.

Neste capítulo serão discutido os benefícios e os desafios de cada uma das alternativas, havendo pequenas referências a aspetos económicos de cada sistema tendo em conta as dificuldades técnicas que delas advém.

4.1. Benefícios e Desafios de cada Alternativa

4.1.1. Navios LNG

Benefícios

Os principais benefícios do uso deste tipo de alternativa são comuns ao MGO, como resultado da não utilização de sistemas que utilizem HFO. Desaparece a necessidade de um pré-tratamento do combustível, que por sua vez implica o consumo de combustível. O volume de produção de resíduos a bordo proveniente do combustível é reduzido e não tem os problemas de compatibilidade que os combustíveis apresentam. Não apresenta problemas de qualidade devido às impurezas que o HFO tem, tais como altos níveis de sedimentos, cinzas ou óleos. É uma das alternativas que mais reduz as emissões. (López, 2015)

Entre as principais vantagens específicas da utilização de LNG pode-se aferir que o preço do LNG durante os anos tem sido inferior relativamente ao do MGO e do HFO. Devido a este fator, em 2020, os portos consultados estimaram que a oferta de LNG iria atingir uma quota de mercado nos combustíveis tradicionais de 13% e que será de 24% em 2025. (López, 2015)

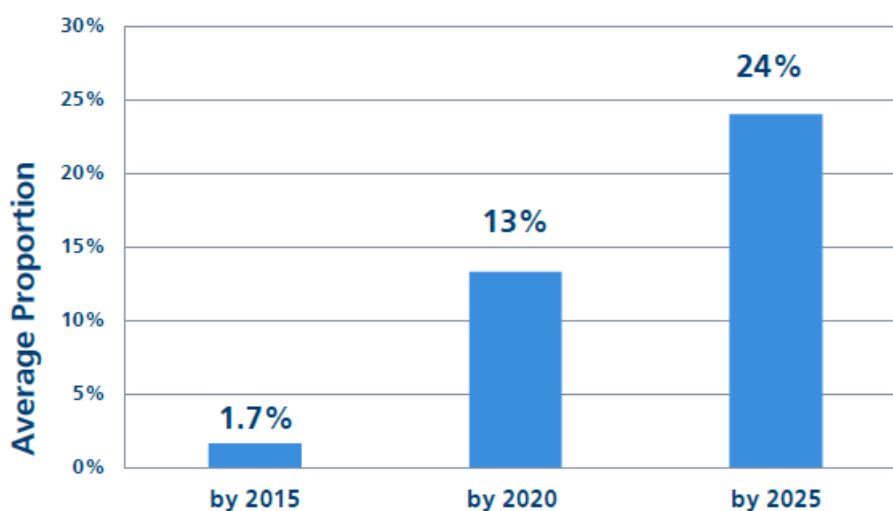


Figura 49- Estimativa de Mercado do LNG(López, 2015)

A tecnologia propulsiva de LNG tem sido usada durante décadas por vários tipos de navios, tornando-a um sistema já comprovado. Um motor apenas a gás tem uma maior redução de emissões do que os outros dois combustíveis. (López, 2015)

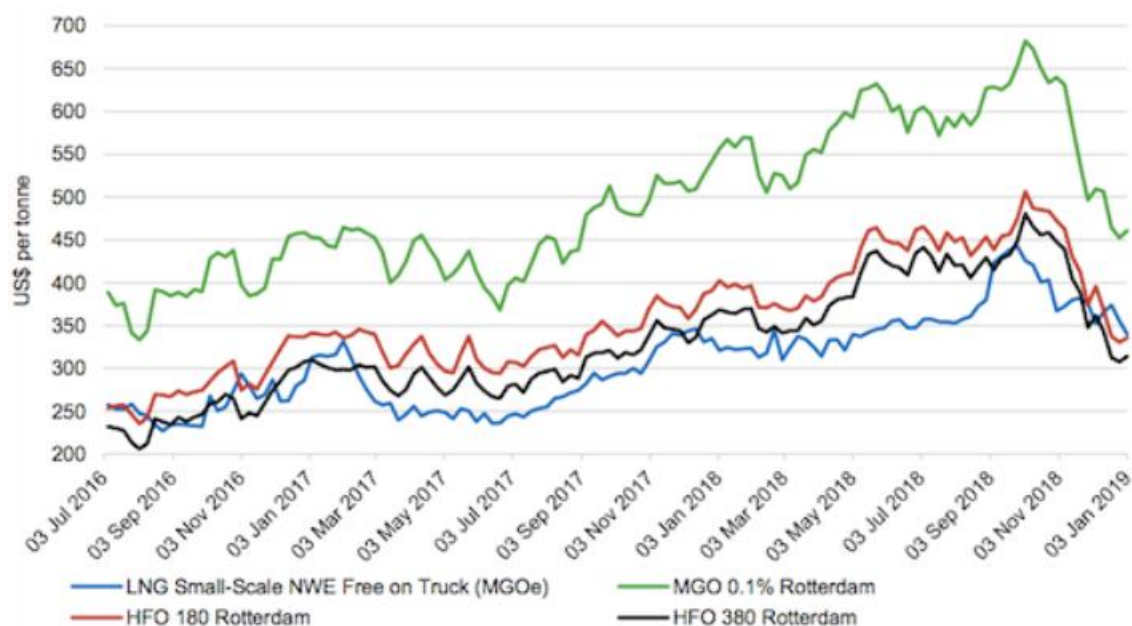


Figura 50- Preços dos combustíveis na Europa NW(LNG as a Shipping Fuel in Northern Europe | Global Maritime Hub, n.d.)

Desafios

O custo do investimento é bastante elevado, motivado sobretudo pelos custos de armazenamento e instalação criogénica. Este tipo de propulsão requer aproximadamente 3,5 vezes mais espaço a bordo para armazenar o LNG em condições criogénicas, do que em relação ao volume necessário para armazenar um combustível tradicional. Este fator não conta o volume necessário para a preparação de gás e para o equipamento de regaseificação para consumo. A perda de receitas provenientes de menos espaço de carga poderá rondar os 3% para navios porta-contentores.(López, 2015)

O fenómeno do metano poder "escapar" não é totalmente controlado. Esta fuga de metano proveniente de restos de combustível não utilizados tem uma contribuição potencial para o aquecimento global de aproximadamente 23 vezes maior do que o CO₂.(López, 2015)

O tratamento da ebulição em períodos de não utilização do navio não está inteiramente resolvido. Exceto no Norte da Europa e em certos projetos específicos, não existe uma boa infraestrutura desenvolvida para o fornecimento de LNG e ainda não existem códigos aprovados internacionalmente para a utilização do LNG como combustível. Existe uma grande falta de legislação sobre a utilização do LNG e

programas de formação e aprendizagem sobre o manuseamento deste combustível são inexistentes para as guarnições que apenas trabalharam com os combustíveis tradicionais.(López, 2015)

4.1.2. Navios a *Dual-Fuel*

Benefícios

Depois de se ter analisado um pouco do sistema *Dual-Fuel* no geral destacou-se que hoje em dia tecnologias capazes de realizar regulamentos futuros podem ser os motores Dual-Fuel. Os motores principais marítimos já não se restringem a uma espécie de combustível devido ao aparecimento de um motor a *Dual-Fuel*, podendo escolher o gás natural ou o gasóleo como combustível de acordo com a necessidade como já referido no capítulo anterior. Na situação atual, o motor de *Dual-Fuel* tem melhores características de emissão e eficiência energética quando utiliza gás natural.(Sentís, 2012)

Um navio com motores de *Dual-Fuel* pode escolher o combustível livremente de acordo com a volatilidade dos preços do mercado de combustível, para que possa economizar o custo do combustível, ao mesmo tempo que pode ampliar as áreas de navegação do navio porque, assim pode garantir que o navio entre em zonas que tenham limites de emissões como as ECA.(Yang et al., 2013)

Um das principais características deste tipo de sistemas é que o tipo de combustível pode ser convertido de forma flexível durante a operação, pode funcionar em baixas emissões, elevada eficiência e num estado estabilizado. As emissões de NOx e CO2 serão reduzidas durante a utilização do gás natural como combustível como pode ser aferido pelas Figuras 51 e 52.(Yang et al., 2013)

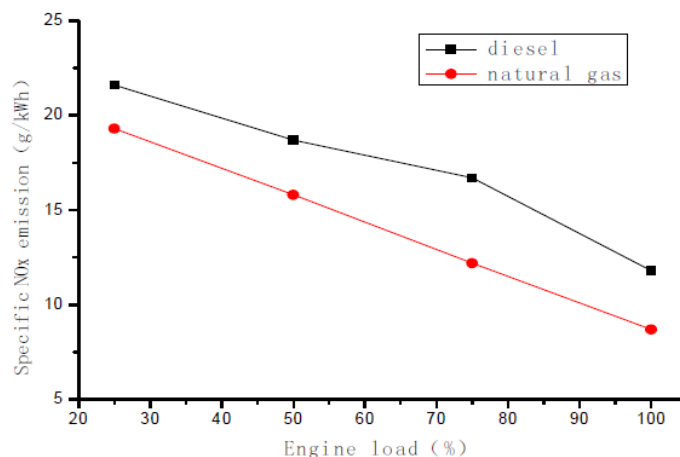


Figura 51- Emissões específicas de NOX(Yang et al., 2013)

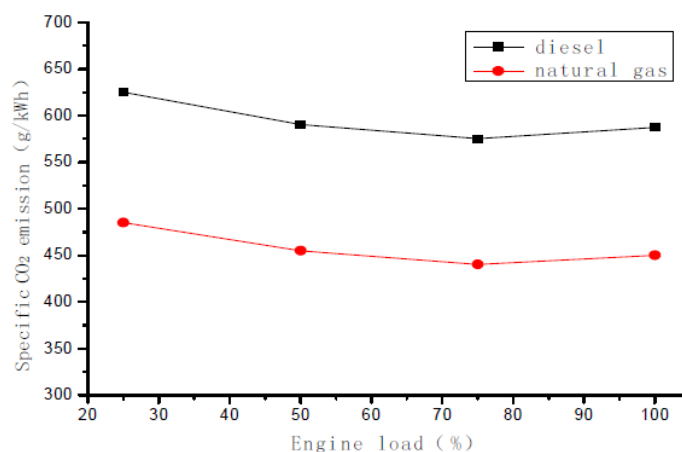


Figura 52-Emissões específicas de CO2(Yang et al., 2013)

A taxa de emissão de NOX diminui com o aumento da carga e a redução de emissões de NOX é melhor com um funcionamento de carga de 75%. A taxa de emissão de NOX por parte de motores que operam a gás natural e diesel é de 11,9 g/kWh e 15,7 g/kWh, respetivamente, a taxa de emissão de NOX diminuiu 24,2%.(Yang et al., 2013)

Relativamente a sistemas *Dual-Fuel Diesel-Electric*, estes têm uma melhor eficiência térmica de propulsão, tanto durante as navegações como nos portos. Menor potência instalada, uma vez que a central elétrica serve tanto a carga de propulsão para as navegações como a carga do porto, a redundância acresce com a utilização de 4 motores.(Harsema-mensonides, 2006)

A capacidade de carga aumenta dentro das mesmas dimensões globais do navio e as guarnições têm mais experiência neste tipo de sistemas *Diesel-Electric* pois estão mais

prontamente disponíveis. O sistema de propulsão elétrica é mais eficaz de funcionar e mais rápido para ligar e desligar.(Harsema-mensonides, 2006)

Desafios

Apesar da perspectiva otimista da aplicação de motores a *Dual-Fuel*, é difícil a sua aplicação nos navios. Os motores a *Dual-Fuel* só conseguem demonstrar as suas principais vantagens na totalidade utilizando o gás natural como combustível principal, o que leva a uma grande dependência da existência de infraestrutura apropriada, nomeadamente a existência de ações próprias de abastecimento de LNG nos portos, embora muitos países estejam a investir neste tipo de sistemas para reabastecimento de navios a LNG. Este processo precisa de tempo para a sua implementação e, na atualidade, a rede de postos de abastecimento de LNG é ainda incipiente.(Yang et al., 2013)

A mudança de um motor normal para um motor de *Dual-Fuel* necessita de muitos equipamentos auxiliares, como um reservatório especial para o armazenamento do gás natural, o sistema de abastecimento do gás, o sistema do gás inerte, entre outros, sendo que estes dispositivos são caros. Além disso, a conversão do sistema de propulsão, pode ter efeitos na estrutura original do navio. A conversão de uma instalação propulsora para *Dual-Fuel* nos navios tem de ser efetuada em tempos curtos e existem poucos especialistas com o conhecimento necessário para realizar a sua manutenção e reparação sendo a manutenção e reparação são difíceis a bordo. Os navios que utilizam LNG que fazem o transporte do gás natural podem utilizar convenientemente o motor de *Dual-Fuel* utilizando diretamente o gás natural evaporado durante o transporte. Mas, devido às mercadorias transportadas por este tipo de navio, só podem navegar rotas determinadas.(Yang et al., 2013)

Tendo em conta aos sistemas de propulsão de *Dual-Fuel Diesel-Electric*, fazendo um ponto de comparação, foi provado que as turbinas a vapor são mais fiáveis ao longo do tempo do seu ciclo de vida do que os motores *Dual-Fuel*, e as centrais de turbinas a vapor necessitam de menos manutenção do que sistemas *Dual-Fuel*. Os motores de *Dual-Fuel Diesel-Electric* têm um grande consumo de óleo lubrificante e as embarcações deste tipo precisam de equipamento adicional para lidar com o excesso de BOG (Boil-off gas). (Harsema-mensonides, 2006)

4.1.3. Navios *Diesel-Electric*

Benefícios

Tendo em conta que este é um tipo de sistema híbrido, os seus benefícios compreenderão as vantagens de cada um dos sistemas do conjunto propulsor. A propulsão mecânica é geralmente mais eficiente à velocidade de projeto, entre 80% e 100% da velocidade máxima. Nesta gama o motor diesel opera no seu ponto de trabalho mais eficiente, conforme ilustrado na Figura 53. (Geertsma et al., 2017)

A propulsão mecânica envolve apenas três componentes no processo de conversão de potência, nomeadamente a máquina térmica, a caixa redutora e o hélice, que em norma tem uma boa operação e um trabalho eficiente. De forma a cumprirem os níveis II e agora o nível III estabelecidos pela IMO, existem motores que têm uma menor potência de saída, o que leva a uma menor emissão de NO_x, e o contrário faz com que a existência de um motor com uma maior potência de saída as emissões aumentarão. O uso de propulsão mecânica tem como vantagem o custo de compra que é baixo, devido à sua baixa complexidade. Isto justifica a aplicação de propulsão mecânica para navios de transporte de cargas. (Geertsma et al., 2017)

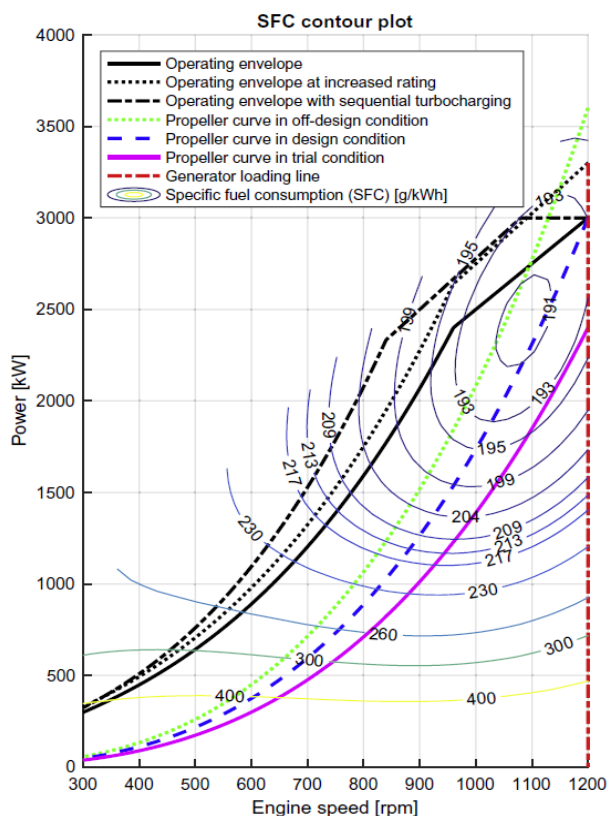


Figura 53-Curvas de funcionamento dos motores Diesel(Geertsma et al., 2017)

Para os navios cargueiros, o consumo de combustível e emissões podem ser reduzidos por recuperação do calor residual nos gases de evacuação e água de arrefecimento para gerar energia elétrica auxiliar e aquecimento, havendo, com isto, um melhor aproveitamento. Com o uso de um CPP (*Controllable Pitch Propeller*) graças à energia elétrica gerada, em que adiciona uma maior liberdade de manobrabilidade ao navio, tornando o sistema de propulsão um pouco mais complexo.(Geertsma et al., 2017)

Relativamente aos benefícios da tecnologia elétrica que faz parte do sistema híbrido, a propulsão elétrica tem um baixo consumo de combustível pois esta energia pode ser armazenada em baterias, rentabilizando o consumo de combustível pelos geradores. A energia elétrica produzida a partir de geradores pode ser usada diretamente para a propulsão, sendo que essa propulsão também pode ser garantida a partir de baterias, o que faz com que este sistema tenha um perfil operacional diverso pois torna-o capaz de desempenhar várias funções em diferentes classes de navios. Para se conseguir retirar rendimento deste sistema, a energia que é gerada pelo sistema tem de ser bem quantificada de forma a cumprir os requisitos indispensáveis para a propulsão sem haver uma produção excedente que não será utilizada e, com isso, desperdiçada. Esta estratégia de controlo garante que os motores ou geradores de energia elétrica não funcionem ineficientemente e, é frequentemente chamada de estação de energia.(Geertsma et al., 2017)

As emissões de NO_x provenientes da propulsão elétrica são inferiores, comparativamente, às da propulsão de um sistema mecânico, porque a potência despendida para a propulsão do navio é, na maioria dos casos, dividida num maior número de motores, devido à menor potência gerada de cada motor no caso da propulsão elétrica. Por exemplo, um navio cruzeiro com uma potência de propulsão de 20 MW por veio, normalmente, possui 5 geradores diesel instalados, com uma velocidade de 720 rpm, enquanto que um outro navio cruzeiro de propulsão mecânica apenas, com os mesmos 20 MW por veio, normalmente, possui dois motores principais cada um funcionando a uma velocidade máxima de 500 rpm. Considerando o nível II do limite de emissões de NO_x, isto significaria uma emissão média de 9,7 g/kWh NO_x para os geradores diesel utilizados na propulsão elétrica e de 10,5 ou 14,4 g/kWh para os motores diesel a quatro ou dois tempos utilizados na propulsão mecânica. Além disso, devido ao conceito do sistema de propulsão elétrica, os geradores diesel funcionam mais perto do ponto de projeto, no qual

normalmente têm uma menor emissão de NOx ou precisam de um menor consumo de combustível. (Geertsma et al., 2017)

A propulsão elétrica necessita de uma reduzida manutenção, pois compartilha-se a propulsão e a carga auxiliar sendo desligados quando não são necessários. A propulsão elétrica origina um reduzido nível de vibrações prejudiciais ao funcionamento nos restantes equipamentos devido à menor dimensão do veio de transmissão mecânica do motor para o hélice. Para esse objetivo, o design do motor e do conversor de potência deve ser otimizado para uma flutuação mínima do torque. A propulsão elétrica tem um potencial de alta disponibilidade, pelo menos se o sistema for projetado para esse fim.(Geertsma et al., 2017)

Desafios

Tendo em conta que este sistema é um conjunto de dois meios de conversão de energia, tem de haver uma junção de fatores a superar por ambos os meios. No sistema mecânico a manobrabilidade é um pouco mais limitada pois, em norma, um propulsor proveniente da energia elétrica permite uma maior flexibilidade, por exemplo, a utilização de propulsores de proa e popa tornam mais versátil as mudanças de direção do navio. A manobrabilidade da propulsão mecânica pode ser sempre melhorada com a utilização de um CPP, mas continua limitada em comparação com propulsores elétricos que se conseguem dispor numa qualquer posição, ou seja, conseguem perfazer um movimento de 360°. O motor ao aumentar o esforço de trabalho, aumenta também a probabilidade de danificação dos componentes sendo necessário um maior número de manutenções. Com a aplicação de um CPP, que pode ser uma estratégia de controlo adequado de forma a reduzir o esforço proveniente das cargas necessárias para o funcionamento do sistema de propulsão.(Geertsma et al., 2017)

A propulsão mecânica tem uma menor eficiência de consumo de combustível e emissões elevadas quando navega a velocidades inferiores a 70% da velocidade máxima. Na propulsão mecânica quando um componente de um equipamento essencial se danifica por vezes põe em causa o bom funcionamento da propulsão de uma embarcação, visto que a falha de um componente fundamental pode conduzir à perda de propulsão.(Geertsma et al., 2017)

As emissões de NOx do motor de propulsão principal são determinadas pela sua curva de funcionamento. Na indústria automóvel, foi mostrado num estudo de motores

diesel de forma a avaliar as emissões de NO_x, durante o perfil de aceleração, as emissões são muito superiores às atuais normas de 80 mg/km, não estando de acordo com o novo ciclo europeu de condução. Esta tendência foi confirmada pelas medições de NO_x realizadas num motor marítimo de investigação MAN4L20/27 de 300 kW sem tecnologia de redução de NO_x, realizadas na Holanda na *Netherlands Defence Academy*.(Geertsma et al., 2017)

Da mesma forma, o diesel utilizado na propulsão mecânica durante a aceleração e o funcionamento a altas velocidades é suscetível de levar a elevadas emissões de NO_x pois é necessário uma maior relação de pressão de gases de evacuação/admissão resultante do trabalho do turbocompressor. As emissões de NO_x de navios nesta situação são suscetíveis de ocorrer a uma taxa mais elevada do que o especificado no padrão de nível II ou nível III.(Geertsma et al., 2017)

As vibrações causadas pelo uso de tecnologia mecânica são passíveis de serem maiores do que um sistema proveniente de conversão elétrica, embora medidas de isolamento podem melhorar isto. As vibrações causadas devido à cavitação acontecem, particularmente em condições dinâmicas, mas podem ser melhoradas com um CPP e planos de controlo adequados.(Geertsma et al., 2017)

Em relação ao sistema elétrico, devido às fases adicionais de conversão nos conversores de potência e motores elétricos, a propulsão elétrica incorre em perdas acrescidas. Estas perdas levam a um aumento do SFC (*Specific Fuel Consumption*), particularmente perto da velocidade máxima do navio. Os motores não necessitam de trabalhar com uma alta carga pois daí advém altos consumos e maiores emissões, daí um funcionamento das embarcações cada vez maior ser a baixas velocidades de forma a aumentarem a sua autonomia mas em contrapartida um motor ao operar a velocidades mais baixas ao não necessitar de uma carga tão alta pode provocar problemas como a carbonização nas câmaras de combustão, mal funcionamento e desgaste.(Geertsma et al., 2017)

A maioria dos navios com propulsão elétrica usam FPP (*Fixed Pitch Propeller*), porque os motores elétricos têm unidades de velocidade variáveis que podem fornecer o máximo de binário a cada velocidade. As vibrações causadas devido à cavitação põem em causa o bom estado da hélice, em que o hélice de passo fixo é usado, normalmente, a partir do controlo de velocidade, sendo uma forma de controlo para motores elétricos. A

cavitação aumenta e causa, potencialmente, a danificação do hélice particularmente para a propulsão elétrica com hélices de passo fixo de controlo de velocidade, bem como para a propulsão mecânica com FPP.(Geertsma et al., 2017)

As diferenças de potencial da rede elétrica e as oscilações de frequência em condições de avaria podem fazer com que os sistemas elétricos sejam desligados, reduzindo assim a fiabilidade e disponibilidade. Particularmente em sistemas elétricos com uma grande quantidade de equipamentos que tenham a capacidade de variar a velocidade, o que pode causar instabilidade.(Geertsma et al., 2017)

4.1.4.Navios de Propulsão Elétrica

Benefícios

É um facto bem conhecido que existe uma enorme pressão social para a redução de emissões poluentes e os motores elétricos vêm ajudar neste aspeto. O número de motores elétricos utilizados na propulsão dos navios tem vindo a aumentar. A introdução de sistemas de propulsão elétricos tem como principais vantagens a sua simplificação geral do sistema de propulsão, compreendendo uma redução dos equipamentos instalados, pelo que será necessário pessoal mais especializado para se realizar as corretas operações do respetivo sistema.(Ajioka, 2013)

No caso dos navios que necessitem de maiores potências para o seu funcionamento, a redução do número de equipamentos ajuda numa maior eficiência de manutenção e de reparação, aumentando o seu ciclo de vida de uma embarcação, havendo uma grande diminuição das vibrações e do ruído provocados a bordo, e uma melhoria da efetividade ao se usar este tipo de propulsão pois as velocidades de rotação são sempre constantes.(Ajioka, 2013)

O sistema gera uma quantidade significativa de energia e o excesso de energia é utilizado e fornecido às bombas de carga, bombas de incendio e outras máquinas auxiliares importantes. O espaço necessário para a instalação de máquinas de propulsão elétrica é muito menor e mais compacto em comparação com os sistemas convencionais.(*Electric Propulsion System for Ship:Future in the Shipping?*, n.d.)

Não existe uma ligação direta do veio do hélice e do motor principal, pelo que na transmissão mecânica de altas potências e a vibração é restrita. Há mais flexibilidade na

instalação de máquinas havendo uma maior facilidade de manutenção. (*Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping?*, n.d.)

Proporciona uma maior manobrabilidade e elevada redundância, há um aumento da carga útil através da localização flexível dos componentes das máquinas. Um menor consumo de combustível, conseqüentemente, uma diminuição das emissões havendo um bom benefício em termos ambientais. Redução do custo do ciclo de vida pois o consumo de combustível diminui e custo de manutenção também sendo que o tempo necessário para se realizar uma paragem para manutenção ou outro serviço diminui. (*Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping?*, n.d.)

A resposta dinâmica é muito melhor relativamente à velocidade máxima de propulsão em comparação com outros sistemas. Menos tempo de inversão em comparação com outros sistemas de propulsão e a disponibilidade do binário máximo em todas as velocidades no hélice havendo uma grande flexibilidade na escolha da velocidade do motor. (*Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping?*, n.d.)

Desafios

As desvantagens incluem um custo inicial mais elevado quando em comparação com sistemas de propulsão com motores de combustão interna, pois a energia convertida a partir do combustível não é totalmente útil de maneira que não é convertida em trabalho necessário para a propulsão. (Ajioka, 2013)

Por vezes, tratando-se de um sistema diferente e melhorado é necessário uma guarnição mais especializada, uma vez que o sistema é completamente distinto do sistema mecânico e envolve uma grande automatização. (*Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping?*, n.d.)

O desenvolvimento tecnológico está a ser uma forma de colmatar os custos de instalação que é das principais desvantagens dos sistemas de propulsão elétrica. O sistema de propulsão elétrico é usado, por exemplo, em quebra-gelos que necessitam de ter um motor elétrico de alta potência capazes de fornecer binários elevados a baixas velocidades. A indústria também está a trabalhar de forma a reduzir o tamanho deste tipo de sistemas, por forma a rentabilizar ainda mais o espaço que é utilizado nas casa das máquinas. (*Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping?*, n.d.)

4.1.5. Navios com Sistemas de Propulsão a Hidrogénio

Benefícios

A utilização deste tipo de propulsão usando o hidrogénio como meio de combustível, vai ao encontro daquilo que se encontra no modo de funcionamento dos sistemas de *Fuel-Cell*. Os elétrodos da *Fuel-Cell* operam com hidrogénio, não necessitando de mais nenhum outro tipo de combustível para o seu funcionamento. Nas *Fuel-Cell* diretas, o hidrogénio puro é fornecido aos elétrodos. Nas *Fuel-Cell* indiretas, utiliza-se um produto como veículo de transporte do hidrogénio (metanol, amónia, hidrazina, etc.), produto esse que, numa primeira fase, é convertido de forma a garantir alguma eficiência no processo, daí resultando, a formação de produtos secundários (como CO₂, no caso de uma conversão de hidrocarbonetos, por exemplo). (Kordesch & Simader, 1995)

De qualquer forma, o uso de um sistema *Fuel-Cell* em navios reduzirá as emissões poluentes comparativamente com os motores mecânicos convencionais, significando que menos dióxido de carbono é produzido por unidade de energia, provenientes, essencialmente, dos combustíveis fósseis, para além de se observar uma diminuição significativa da produção de ruído e de vibrações ao se utilizar este sistema, o que torna mais ampla a utilização operacional do navio. A vantagem ambiental é grande pois a utilização do hidrogénio como combustível, de forma a produzir energia elétrica a partir das reações de eletrólise reduz as emissões de CO₂ relativamente à utilização de outros tipos de combustíveis. (Kordesch & Simader, 1995)

Além das vantagens básicas, o sistema *Fuel-Cell* com uma membrana sólida de polímeros PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*), sistema utilizado nos submarinos da classe Tridente da Marinha de Guerra Portuguesa, também apresenta outras vantagens. O seu comportamento é rápido ao ligar e desligar, baixa degradação devido à tensão produzida e longa vida útil. As cargas e as temperaturas são favoráveis no comportamento do ciclo. Tem uma boa capacidade de operação de sobrecarga e trabalha a uma baixa temperatura de operação (80°C) e, a ausência de eletrólito corrosivo líquido. (Siemens AG, 2009)

Desafios

Reconhece-se que a tecnologia de *Fuel-Cell* ainda é um meio de propulsão pouco divulgado, para se tornar uma alternativa viável e realista para futuras soluções em meios navais. Uma das mais importantes é a necessidade de se impulsionar uma tecnologia que vingue no mercado, criando assim uma produção em massa levando a uma redução de custos na instalação deste tipo de sistemas.(Tronstad & Langfeldt, n.d.)

Outro obstáculo é a forma de produzir hidrogénio e outros combustíveis novos, como o metanol. As mudanças políticas observadas em muitos países estão a ocorrer, ajudando a resolver problemas relativos a este sistema. Por exemplo, na Noruega, o governo criou várias estruturas para ferries que utilizam este sistema de propulsão e licenças para novas soluções de rotas.(Tronstad & Langfeldt, n.d.)

Ainda vários desafios terão de ser abordados antes que os sistemas de *Fuel-Cell* sejam capazes de satisfazer todos os requisitos necessários para os meios marítimos e possam competir com soluções marítimas de última geração. Um maior desenvolvimento de sistemas de *Fuel-Cell* é necessário, de forma justificar a aplicação destes sistemas nos navios. Os ciclos combinados de *Fuel-Cell* têm o potencial de atingir um consumo de combustível ainda mais baixo. A utilização de sistemas combinados com componentes auxiliares de armazenamento de eletricidade, capazes de suportar variações de carga significativas, requerem um maior desenvolvimento.(Biert et al., 2016)

Atualmente, os sistemas de *Fuel-Cell* são uma tecnologia um pouco dispendiosa, mas espera-se que os preços dos sistemas possam ser reduzidos para níveis em que o custo de um investimento mais elevado seja justificado pelas vantagens. Além disso, a maioria da produção do hidrogénio, é atualmente obtida com auxílio de combustíveis fósseis. Prevê-se que o desenvolvimento de infraestruturas de LNG e dos sistemas de *Fuel-Cell* que utilizem gás natural possam facilitar a introdução de combustíveis gasosos e sistemas de *Fuel-Cell* nos navios.(Biert et al., 2016)

4.1.6. Tecnologias para Diminuir as Emissões

4.1.6.1. Sistema *Scrubber*

Benefícios

Os navios que utilizem este tipo de sistema podem continuar a consumir HFO, um combustível mais barato do que, por exemplo, o MGO sendo a disponibilidade de HFO bastante satisfatória. As emissões de carbono devido à utilização do *Scrubber* são menores do que a utilização de combustíveis mais refinados, porque para os produzir, a refinaria deve primeiro retirar por completo os componentes de enxofre através de um processo que tem emissões consideráveis de CO₂. (López, 2015)

O sistema *Scrubber* é um método para satisfazer as baixas emissões de enxofre após a combustão do combustível. Assim, a eficiência do sistema deve ser suficiente para atingir uns certos níveis de emissões de SO_x. A eficiência depende do teor de enxofre no combustível relacionado com o limite de enxofre. As eficiências necessárias estão listadas na Figura 54 para vários valores de teor de enxofre de combustível nas ECA e nas zonas que não são ECA. (MAN, n.d.-a)

Fuel sulphur S%	Scrubber efficiency in ECA, % Sulphur limit: 0.1%	Scrubber efficiency in non-ECA, % Sulphur limit: 0.5%
3.5	97.1	85.7
3.0	96.7	83.3
2.5	96.0	80.0
2.0	95.0	75.0
1.5	93.3	66.7
1.0	90.0	50.0

Figura 54- Eficiência necessária dos Scrubbers SOX (MAN, n.d.-a)

Embora a eficiência necessária do *Scrubber* dependa da área e do combustível utilizados, é suficiente para limpar os gases de evacuação de um combustível de 3,5% de enxofre para satisfazer os requisitos. As informações sobre os sistemas, incluindo a variação das eficiências, devem ser dadas ao fornecedor do respetivo *Scrubber*. (MAN, n.d.-a)

O aumento da pressão de retorno influenciará ligeiramente o desempenho do motor. A quantidade de gases de evacuação diminui e a temperatura de saída aumenta dependendo da pressão de retorno adicional. O SFOC (*Specific Fuel Oil Consumption*)

aumenta em conformidade. A Figura 55 mostra a influência sobre estes parâmetros em relação à pressão adicional máxima. Em casos em que apenas uma fração da pressão máxima de retorno está presente, a influência nos parâmetros é reduzida em conformidade.(MAN, n.d.-a)

Power % MCR	ΔP (max) mbar	Δ SFOC g/kWh	Δ Exhaust gas % mass	Δ TC outlet °C
100	60.0	+1.0	÷7	+20
75	50.0	+1.0	÷7	+20
50	40.0	+1.0	÷10	+20
25	20.0	+1.0	÷10	+20

Figura 55-Relação entre a pressão de retorno adicional e os parâmetros do motor(MAN, n.d.-a)

A pressão de retorno adicional de um *Scrubber* de SOX depende do tipo de *Scrubber*. Normalmente, pode-se esperar uma pressão de retorno de 20 a 40 mbar a 100% do MCR (*Maximum Continuous Rating*). Dependendo dos parâmetros de desempenho, o SFOC é de 0,3-0,7 g/kWh.(MAN, n.d.-a)

Desafios

O investimento inicial nestes equipamentos é elevado e os custos operacionais também são bastante elevados. O consumo de MGO nos motores auxiliares aumenta para alimentar estes equipamentos, e é necessário contabilizar o consumo adicional dos químicos necessários ao processo. Em equipamentos de circuito híbrido e aberto, é necessária a descarga de resíduos químicos.(López, 2015)

Em certos países existem leis que não permitem qualquer utilização deste tipo de sistema e se não forem permitidas descargas portuárias, só podem ser utilizados equipamentos de circuito fechado ou híbrido. Estes equipamentos necessitam de mais espaço para armazenar água doce e, ainda que em quantidades pequenas, mas também geram resíduos químicos. Por conseguinte, devem existir portos que permitam a descarga destes resíduos.(López, 2015)

Um dos aspetos que mais retardam o uso deste sistema são os requisitos da IMO, os quais sofreram algumas alterações em 12 de maio de 2015. O objetivo destas alterações é clarificar o processo, de forma a aprovar equipamentos de circuito aberto. Os critérios da IMO estipulam agora que, durante o arranque das novas unidades, o pH da água após

a utilização do *Scrubber* não deve ser superior a 6,5 e a uma distância de 4 metros da descarga do navio, ou seja, o espaço exigido por este tipo de equipamento é grande. A localização certa deve ser revista sem comprometer a capacidade de carga do navio ou comprometer a sua estabilidade. Estes equipamentos exigirão uma manutenção especial devido à natureza dos gases de evacuação e à sua localização. A utilização de *Scrubbers* não satisfaz as limitações dos NO_x, pelo que é necessário instalar equipamentos adicionais de redução de emissões (EGR e SCR). O navio deve ter a opção de consumir MGO, caso o sistema do *Scrubber* falhe. Ainda não se sabe se os atuais fabricantes destes equipamentos poderão produzir equipamentos suficientes, em termos qualitativos, exigidos pelo mercado.(López, 2015)

4.1.6.2. *Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)*

Benefícios

Na maioria das aplicações do sistema de SNCR em motores, o seu funcionamento é compreendido num intervalo de temperaturas adequado e o tempo de atuação é dos mais eficientes. Nos motores marítimos, a gama de temperatura adequada ocorre nos encanamentos dos gases de evacuação, onde o sistema atua efetivamente. Para estas aplicações, o controlo global pode ter uma eficiência de 30% a 40%.(Miller & Systems, 2017)

A eficiência da utilização do reagente é significativamente menor com o SNCR do que com o SCR. Nos sistemas SNCR comerciais, a utilização situa-se tipicamente entre 20% e 60%, conseqüentemente, geralmente três a quatro vezes mais reagente é necessário com SNCR para alcançar a redução de NO_x semelhante à dos processos de SCR. O sistema de SNCR normalmente alcança uma redução de 30%-40% das emissões, como já referido, de NO_x com rácios estequiométricos de 1,0-2,0.(Miller & Systems, 2017)

O baixo custo da sua utilização é uma das suas grandes vantagens e é um sistema de longa duração, prolongando a vida útil do próprio motor. Baixo consumo de energia, variando de 20-40 kW sendo, que este tipo de este sistema é fácil de atualizar pois tem uma construção simples e de fácil acesso.(*Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) System – BDEnergySystems*, n.d.)

Desafios

Os principais impactos operacionais do SNCR incluem as incrustações no pré-aquecedor do ar, a contaminação das cinzas, as emissões de N₂O e pequenos aumentos de temperatura. Um grande impacto no sistema de SNCR está no pré-aquecedor de ar, onde o amoníaco residual reage com o SO₃ na chaminé por onde saem os gases de evacuação para formar sulfato de amónio e bissulfato onde ocorrem ligações e corrosão a jusante. Altos níveis de contaminação de amoníaco podem ser transportados pelas cinzas o que é um dos problemas. Quantidades significativas de N₂O podem ser formadas quando o reagente é injetado em locais em que o sistema SNCR esteja abaixo do intervalo ótimo de temperatura de funcionamento. A injeção de ureia tende a produzir um maior nível de N₂O em comparação com o amoníaco. A distribuição do NH₃ é difícil de prever, para soluções aquosas de NH₃ e ureia, em que são necessárias grandes quantidades de água, levando à perda de energia. A taxa de calor unitária aumenta ligeiramente devido às perdas de calor latente resultantes da vaporização de líquidos injetados e/ou do aumento da potência necessários para os sistemas de injeção de alta energia. Um rácio da eficiência e do poder das perdas variam normalmente entre 0,3% e 0,8%.(Miller & Systems, 2017)(*Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) System – BDEnergySystems*, n.d.)

4.1.6.3. *Selective Catalytic Reduction (SCR)*

Benefícios

A principal vantagem do SCR é a grande remoção de NO_x que faz com que seja das principais vantagens deste sistema, com uma menor quantidade de contaminação por parte do amoníaco.(Reduction et al., 2002)

A tecnologia é altamente eficiente de pós-tratamento para contrariar as emissões NO_x tendo uma eficiência muito alta, quase 100%. No sistema SCR, o amoníaco (NH₃) ou a ureia (NH₂CONH₂) é usado como agente redutor dos óxidos de azoto (NO_x) que devem ser eliminados dos gases de evacuação provenientes dos motores.(Reduction et al., 2002)

Este sistema é aplicado de forma a que as concentrações de NO_x sejam bastante baixas, o seu funcionamento ocorre a uma temperatura mais baixa comparativamente com o sistema SNCR e não necessita de grandes modificações estruturais e a nível da tecnologia no motor e no próprio nos sistema de gases de evacuação.(Prabhu, 2018)

Desafios

O grande desafio envolvido com os sistemas SCR tem a ver com o funcionamento do catalisador pois este tipo de sistema tende a trabalhar com baixas temperaturas e o processo de se adicionar NH₃ tem de ser adequado pois as condições de carga do motor podem variar com frequência. Adicionalmente, o risco associado ao armazenamento e manuseamento de NH₃ gasoso é significativo e conseqüentemente não é comumente usado diretamente como um agente redutor, devido a razões de natureza tóxica do NH₃ e do manuseamento e até de problemas de armazenamento, a ureia é o substituto preferido para o NH₃ como um agente redutor, principalmente nos automóveis. O melhor procedimento será injetar ureia na forma de spray para o fluxo dos gases de evacuação mesmo antes de entrar no catalisador do SCR. A ureia é um químico ambientalmente benéfico fazendo com que o processo se torne mais adequado.(Prabhu, 2018)

O NH₃ é corrosivo, tóxico para o meio ambiente, necessita de ser armazenado a alta pressão, e para introduzir o NH₃ nos gases de evacuação é necessário um mecanismo de controlo adequado. Uma das principais desvantagens é envolver um catalisador que faz com que seja necessário mais espaço para que seja instalado, alto capital e custos de exploração. A formação de outras emissões e a formação de espécies indesejáveis e a contaminação por parte do NH₃, podem ser controladas a partir da instalação de um catalisador de oxidação após o sistema SCR.(Prabhu, 2018)

4.1.6.4. Exhaust Gas Recirculation (EGR)

Benefícios

O sistema *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) tem sido muito popular para reduzir as emissões de NO_x. O EGR envolve direcionar uma fração dos gases de evacuação do motor para o sistema de admissão, onde se mistura com o ar fresco que entra antes de ser levado para o cilindro.(Hebbar & Bhat, 2012)

As temperaturas máximas de combustão são um dos principais fatores para a formação de NO_x o qual pode ser bastante diminuído quando a concentração de O₂ na câmara de combustão é reduzida. Ao usar o EGR, parte do O₂ do cilindro é substituído pelos gases CO₂ e H₂O. Com a concentração local de O₂ reduzida, o combustível injetado deve ser pulverizado mais amplamente para formar uma mistura e, como consequência disso, dois fatores se tornam muito proeminentes.(Hebbar & Bhat, 2012)

Em primeiro lugar, como uma dada quantidade de combustível terá que se difundir num volume mais amplo para encontrar O₂ suficiente, alguns dos constituintes do EGR como CO₂ e vapor de água também estarão presentes na mistura. Esses constituintes absorvem energia térmica libertada pela combustão.(Hebbar & Bhat, 2012)

O segundo fator é devido à disponibilidade reduzida de oxigênio. O atraso da ignição à medida que a presença de oxigênio baixa, estende a combustão ao curso de expansão, reduzindo a duração total da combustão. O efeito líquido de ambos os fatores é reduzir a temperatura de combustão máxima, reduzindo assim as chances de formação de NO_x.(Hebbar & Bhat, 2012)

Desafios

Uma vez que o sistema EGR reduz o oxigênio disponível nos cilindros, a formação de partículas é aumentada quando a EGR é aplicada. Este tem sido tradicionalmente um problema com os motores, onde o NO_x e outras partículas são formadas. Devido ao fraco teor de oxigênio presente nos cilindros a combustão não irá ocorrer eficientemente, pelo que, a formação de produtos carbonosos no sistema será inevitável, dando origem a corrosões e avarias prematuras nos motores.(*Exhaust Gas Recirculation (EGR), NO_x and particulate measurement / Combustion*, n.d.)

A redução do oxigênio que depois fica disponível no cilindro reduzirá a potência máxima disponível do motor. Por esta razão, o EGR é normalmente desligado quando é exigida toda a potência, pelo que a abordagem do sistema de EGR para controlar o NO_x falha nesta situação.(*Exhaust Gas Recirculation (EGR), NO_x and particulate measurement / Combustion*, n.d.)

O EGR não consegue responder instantaneamente às alterações de carga, e os gases de evacuação demoram tempo a fluir em torno do circuito EGR. Isto torna a calibração do comportamento transitório do EGR particularmente complexa, tradicionalmente a válvula EGR é fechada durante os transientes e, em seguida, reaberta uma vez que o estado estável é alcançado. No entanto, o pico de emissões de NO_x e partículas associadas ao fraco controlo do EGR fazem com que seja necessário encontrar uma solução de forma a resolver este problema.(*Exhaust Gas Recirculation (EGR), NO_x and particulate measurement / Combustion*, n.d.)

Os gases que voltam a circular são normalmente introduzidos no sistema, na admissão, antes dos cilindros. Apesar disso, a mistura perfeita dos gases é impossível de conseguir a todas as velocidades e cargas de funcionamento do motor e particularmente durante o funcionamento transitório. Por exemplo, a má distribuição do EGR cilindro a cilindro pode resultar que num cilindro receba demasiado, causando elevadas emissões de partículas, enquanto outro cilindro recebe muito pouco, resultando em elevadas emissões de NOx desse cilindro. (*Exhaust Gas Recirculation (EGR), NOx and particulate measurement / Combustion*, n.d.)

O gás de combustão residual que permanece no cilindro no final do curso de evacuação é misturado com o de entrada. Existe, portanto, uma proporção de EGR interno que deve ser tida em conta no controlo de funcionamento. A eficiência da limpeza variará com a carga do motor, e num motor equipado com um tempo de injeção variável deve ser considerado um novo parâmetro. (*Exhaust Gas Recirculation (EGR), NOx and particulate measurement / Combustion*, n.d.)

4.1.6.5. Combustíveis com baixo teor de enxofre

Benefícios

Os combustíveis marítimos com um baixo teor de enxofre na sua constituição conseguem atingir metas a nível ambiental e de saúde mais satisfatórias pois as emissões de gases de efeito estufa e a poluição do ar são reduzidas. (Notteboom, 2010)

A utilização deste tipo de combustíveis com baixo teor de enxofre permite o uso de tecnologias avançadas para reduzir poluentes nocivos. O uso de conversores catalíticos e filtros de partículas pode ser utilizado para praticamente eliminar as emissões de NOx e PM. (Notteboom, 2010)

Estes combustíveis permitem aos navios o uso de tecnologia mais limpa, com dispositivos avançados de controlo de emissões, resultando em uma melhoria significativa da qualidade do ar. Além disso, muitas tecnologias de controlo para partículas nocivas e emissões que diminuem a camada do ozono têm melhor desempenho em condições de combustão com combustíveis de baixo teor de enxofre. (*Pros and cons of low sulfur fuel - FreightWaves*, n.d.)

Desafios

Provavelmente, a principal desvantagem deste tipo de combustíveis com menor teor de enxofre é ser muito mais caro do que os atuais combustíveis que são comercializados. Na indústria de produção deste tipo de combustíveis prevê-se que os preços das refinarias que os produzem serão mais caros que os combustíveis convencionais em 2020, o que pode dar aos armadores motivos para violar as regras que exigem o uso de combustível com baixo teor de enxofre. Há também preocupações sobre se as refinarias serão capazes de produzir combustível com baixo teor de enxofre suficiente para a enorme frota mundial. (*Pros and cons of low sulfur fuel - FreightWaves, n.d.*)

5. Aplicabilidade a navios de guerra

Existem vários tipos de navios de guerra tendo em conta a necessidade de as marinhas terem um leque de capacidades que lhes garanta flexibilidade e adaptabilidade às missões com que se deparam. Os navios de guerra têm como função principal o combate com outras forças navais, e a sua defesa própria.

A superioridade aérea local no caso de porta-aviões, visando defender a força em que está inserido contra aviões inimigos, a projeção de força, a dissuasão, através de navios de superfície, e submarinos, o transporte de tropas e transporte logístico, são alguns exemplos das capacidades que uma marinha de guerra deve ter, necessitando, para isso, de navios com diversas valências.

Ao discutir as características individuais dos navios, o seu papel como parte de uma força deve ser levado em conta pois, em geral, os navios operam em diversos cenários e realizam diferentes missões. Todas as unidades navais precisarão de sensores para detetar outros navios e armas para ser capaz de se defender e atacar dos seus inimigos. Devem ser furtivos, ou seja, de difícil deteção para o inimigo. A capacidade de permanência no mar deste tipo de navios depende da suscetibilidade de ser atingido e da sua vulnerabilidade aos efeitos do armamento inimigo. (Tupper, 2013)

A suscetibilidade de um navio depende da sua capacidade de evitar a sua deteção pelo inimigo. Inevitavelmente, um navio de guerra cria uma série de assinaturas nomeadamente acústica, radar, magnética e térmica que podem trair a sua presença e fornecer informações cruciais ao inimigo tanto da sua presença como até do tipo de embarcação que ali se encontra. Sendo a assinatura acústica a mais fácil de detetar na medida em que o som se propaga a grandes distância na água, a atenção ao ruído num navio de guerra é um dos mais importantes aspetos do seu projeto e operação. (Tupper, 2013)

Todos os sistemas devem ser concebidos e operados com menor nível de produção de ruído, entre outros fatores, a fim de dificultar a deteção. O ruído causado pelos sistemas de propulsão é dos mais característicos e transmite-se diretamente por efeito hidrodinâmico (hélice) e por efeito vibratório (vibração estrutural) e é facilmente identificado através do uso de sonares passivos, nomeadamente em submarinos. Os níveis de ruído podem ser reduzidos na fase de projeto, desenvolvendo maquinaria menos ruidosa, usando sistemas que minimizem a transmissão das vibrações do equipamento

para a estrutura. A aplicação de revestimentos especiais no casco (revestimentos anecoicos em submarinos, por exemplo) ou, a minimização de irregularidades do casco suscetíveis de provocar turbulência e cavitação, reduz também a emissão de ruído hidrodinâmico na água.(Tupper, 2013)

É impossível remover completamente essas assinaturas, na verdade, mas em alguns casos, o mar é capaz de “abafar” essas assinaturas, pois devido às variações de pressão causadas pela variação de temperatura com a profundidade a zona mais favorável à propagação do som pode ficar abaixo ou acima da profundidade de operação da plataforma sonar inimiga (quer seja um submarino ou um VDS). (Tupper, 2013)

O objetivo do design dos navios de guerra é reduzir as assinaturas para níveis que o inimigo tenha mais dificuldade em detectar. Assinaturas baixas melhoram as hipóteses de sucesso do uso de contramedidas e a utilização de meios de empastelamento de forma a enganar os sistemas de armas do inimigo. Como parte das suas contramedidas, um navio pode interferir nos radares do navio inimigo, embora a guerra eletrônica ativa contribua para trair a presença do navio que a ela recorre.(Tupper, 2013)

No que se refere aos sistemas de propulsão, que como já foi referido, são uma das mais importantes fontes de ruído do navio. Existem sistemas que devido à sua natureza, não são os mais adequados para serem utilizados como meios de propulsão de um navio de guerra pois têm algumas características que podem pôr em causa a sua capacidade operacional. Nesta parte serão discutidos alguns aspetos relativos a esta importante questão à luz das tecnologias que foram focadas nos capítulos anteriores.

A vulnerabilidade de um navio de guerra tem sido alvo de muita investigação. A avaliação dos riscos e probabilidades de avarias e dos seus efeitos na missão do navio, são, em unidades navais mais importantes, analisados de forma exaustiva de forma a encontrar e reduzir os elementos de menor fiabilidade dos sistemas. Pretende-se, portanto, maximizar a disponibilidade dos sistemas. (Tupper, 2013)

Um dos aspetos mais importantes é a deteção precoce de avarias ou de tendências que indiquem o risco próximo ou iminente da sua ocorrência. A utilização de sensores ou um adequado plano de manutenção preventiva são instrumentos utilizados neste sentido.(Tupper, 2013)

Os sistemas são, em caso de avaria, avaliados usando dados já existentes, e processos de trabalho para combater essas mesmas avarias são estabelecidos. Por exemplo, serviços tais como a produção e distribuição de energia, dependem desses mesmos dados para agilizar o processo tanto de reparação como de manutenção. A vulnerabilidade é definida conforme as consequências durante um ataque ou de uma avaria, em virtude de um ataque/avaría irão depender das ações tomadas pelas equipas que estão a trabalhar nas respetivas limitações. Por exemplo, no caso de um alagamento, é necessário estabelecer parâmetros de funcionamento que já estão padronizados de forma a combater o problema em questão, os recursos para resolver o problema devem estar sempre à disposição para haver uma rápida atuação e, a realização de exercícios de treino tem de ser feito para um bom desempenho dos indivíduos envolvidos.(Tupper, 2013)

5.1. Adversidades

Os sistemas de propulsão têm de obedecer aos requisitos que foram definidos em função do perfil de operação previsto para o navio e o tipo de missões a que se destina. A conceção de um navio de guerra envolve várias etapas, desde a realização do seu projeto ou até mesmo a renovação completa do sistema de propulsão, sendo o projeto de um navio e a eficiência do sistema de propulsão dos pontos mais importantes a ter em conta. A seleção do sistema de propulsão é influenciada pelo perfil da missão para o qual o navio é projetado.(Range, n.d.)

Em qualquer navio a escolha do sistema propulsor, para além de atender a determinadas características estabelecidas nos requisitos de operação (assinatura acústica, custo do ciclo de vida, fiabilidade, etc..) tem de fornecer a potência necessária para que o navio atinja a velocidade de projeto. A potência é calculada a partir da resistência ao avanço, que depende do deslocamento, dimensões e forma do casco, e do tipo de propulsor, pois consoante se trate de hélice, jato de água, propulsor azimutal, tubeira ou outro sistema, o rendimento propulsivo será diferente e a potência instalada variará com o mesmo. A otimização do propulsor consiste numa afinação que poderá permitir grandes economias ao longo do ciclo de vida do navios pois essa afinação permitirá chegar ao valor ótimo de eficiência do sistema em causa. A escolha da máquina é também importante na medida em que potência a mais introduz ineficiência e tem um custo acrescido e potência a menos origina operação em sobrecarga e desgaste prematuro da máquina, perda de rendimento e elevada poluição.

A evolução das legislações ambientais está a levar a uma crescente demanda por atualizações ambientais para os meios navais existentes, sendo que a capacidade de se responder a essas necessidades já é feita pelas marinhas e pelos fabricantes que assumem as responsabilidades pelos serviços e manutenções das embarcações durante o ciclo de vida dos produtos. (Range, n.d.)

O desenvolvimento de sistemas de propulsão para navios de guerra com níveis de emissão reduzidas enfrenta ainda algumas dificuldades, nomeadamente a escassez de espaço a bordo de unidades navais, que são em geral navios muito atravancados, e com necessidade de grande autonomia, que limita as opções disponíveis dado o espaço disponível. O largo espectro de missões requer uma maior flexibilidade de perfis de operação. Muito se tem evoluído noutras áreas ambientais, tais como o tratamento e a gestão de resíduos. A falta de regulamentação específica para navios de guerra também não tem motivado as marinhas de todo o mundo a investirem mais na transformação das suas unidades. (Rousseau, 2019)

Contudo a identificação dos impactos ambientais de um navio de guerra é um ponto importante a ter em conta no seu projeto. A abordagem a este tipo de problemas, que têm de ser resolvidos, está a ser estendida a todos os construtores de equipamento naval, mas que também prestam serviços de manutenção.

5.2. Tipos de Navios e Moldes Operacionais

Tendo em conta que cada navio pode desempenhar funções operacionais diferentes, os sistemas de propulsão também devem ser específicos tendo em conta o tipo de missão principal que o navio deva desempenhar. Refere-se que algumas das tecnologias descritas, não são utilizadas em unidades navais não sendo abordados nesta parte.

A Guarda Costeira da Finlândia usa navios a *Dual-Fuel* com baixos níveis de emissões. O navio tem três motores *Wärtsilä 34DF*, como mostrado na Figura 56, que usam combustíveis à base de petróleo bruto ou LNG. Os motores podem alternar entre combustíveis sendo da sua preferencial utilização o LNG pois este é mais barato, sem haver perda de potência ou velocidade. Na conceção do navio foi dada especial atenção às questões ambientais e a soluções energéticas mais eficientes. Além de executar tarefas de controlo de fronteiras marítimas, o navio polivalente serve para missões de busca e

salvamento marítimo e exigentes operações de segurança ambiental, como por exemplo uma resposta a possíveis derrames.(Range, n.d.)

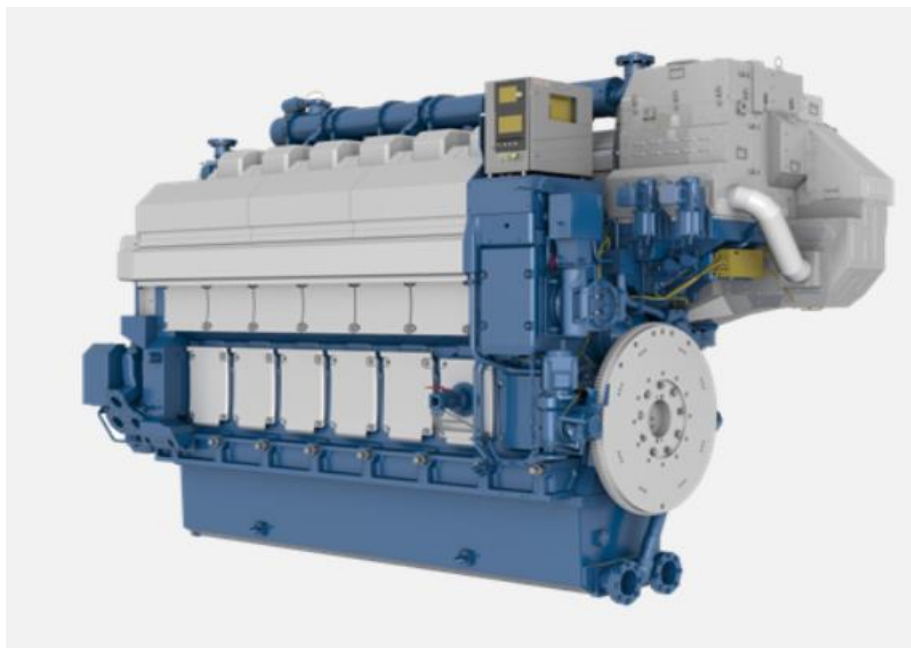


Figura 56-Motor Wärtsilä 34DF(Wärtsilä 34DF, n.d.)



Figura 57-Navio da Guarda Costeira da Finlândia, Turva(Range, n.d.)

Uma opção híbrida, é sempre cuidadosamente avaliada por todas as Marinhas que pretendem adquirir este tipo de equipamento, têm de atender aos exigentes requisitos de redundância e sustentabilidade, de facto, este tipo de sistema é muito convincente e pode vir a ser uma boa escolha para meios de propulsão naval, sendo a sua resposta bastante

positiva. Um exemplo é o caso das fragatas Alemãs da classe *Baden Württemberg* que utilizam um sistema *Diesel-Electric*. (*Our stories - Hybrid propulsion for naval vessels – Rolls-Royce, n.d.*)

O sistema *Combined Diesel Electric Or Gas* (CODLOG) é otimizado para cascos típicos de fragatas ou contratorpedeiros, navios com um perfil operacional muito variado. Este tipo de sistema permite dispor da velocidade máxima do navio em apenas alguns minutos e retém a energia necessária para um eficiente desempenho da instalação propulsora. Os sistemas de geração de energia instalados devem incluir adaptabilidade para um futuro crescimento e, ao mesmo tempo, suportar os altos níveis de confiabilidade, disponibilidade e capacidade de sobrevivência exigidos pelos navios de guerra modernos. (*Our stories - Hybrid propulsion for naval vessels –Rolls-Royce, n.d.*)

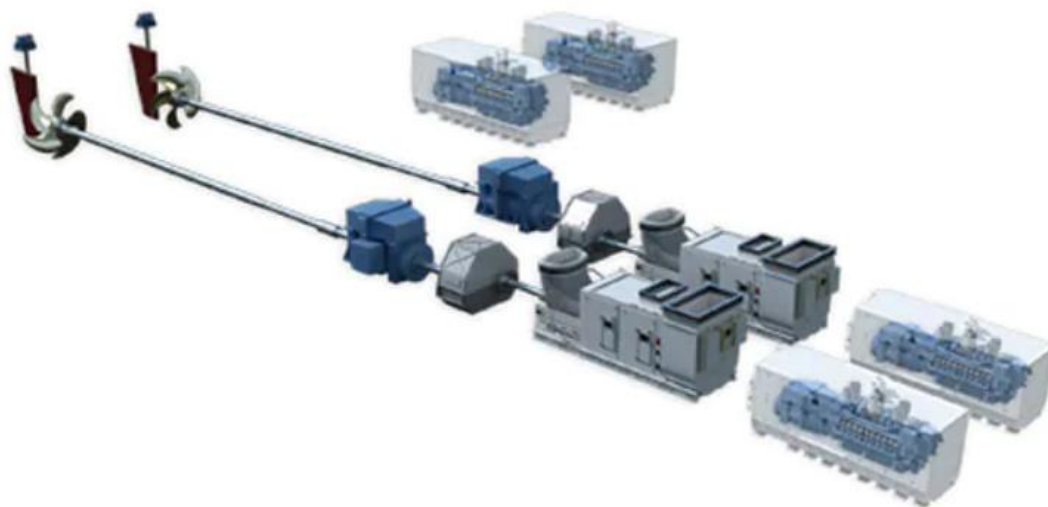


Figura 58-Sistema CODLAG da *Rolls-Royce*(*Our stories - Hybrid propulsion for naval vessels –Rolls-Royce, n.d.*)



Figura 59-Fragata Alemã da classe *Baden Württemberg*(*Dienstantritt für die erste „F 125“ ab Mai - THB, n.d.*)

Os navios de propulsão elétrica têm de produzir uma enorme quantidade adicional de energia elétrica, destinada à propulsão. Isso oferece duas vantagens importantes: não há a necessidade da ampliação dos sistemas elétricos e o sistema de alimentação das armas e os sensores está mais otimizado. Além disso, como os navios desta natureza serão mais eficientes, sendo a manutenção a realizar mais facilitada, com um menor desgaste e menor número de componentes, necessitarão de menos elementos para realizar manutenções.(Sauvé, 2016)

Por exemplo, o navio da classe *Zumwalt* da Marinha dos Estados Unidos da América irá ter uma guarnição de 100 pessoas, enquanto outros *destroyers* são normalmente tripulados por 300 marinheiros. Este navio integra um sistema totalmente elétrico com *Integrated Power System (IPS)*, composto por duas turbinas geradoras, duas turbinas geradoras auxiliares e dois motores de indução.(*DDG 1000 Zumwalt Class - Multimission Destroyer - Naval Technology, n.d.*)



Figura 60-DDG-1000 Zumwalt(Orcamento de defesa dos EUA poderá sofrer grandes cortes no orçamento nos próximos anos - Meta-Defense.fr, n.d.)

As unidades navais que utilizem um sistema de propulsão a hidrogénio têm bastantes vantagens a nível operacional, já referidas no capítulo anterior, havendo uma grande utilização em submarinos sendo estes um meio marítimo com um grande nível tecnológico. Por exemplo, a classe de submarinos Tridente que faz parte da Marinha de Guerra Portuguesa distingue-se pela sua grande capacidade tecnológica de vigilância e recolha de informação, bem como pela sua performance de atuação silenciosa, que se traduz na sua utilidade de emprego em missões de vigilância discreta das atividades no mar e em missões internacionais no quadro das alianças e compromissos assumidos por Portugal.

Um sistema que também está cada vez mais presente em navios de guerra é a tecnologia SCR, que por norma é acoplado diretamente ao motor. Este tipo de sistema é frequentemente encontrado em embarcações de patrulha costeiras que têm como principais funções cobrir várias missões da guarda costeira, incluindo busca e salvamento, vigilância ambiental, controlo de fronteiras, e missões de soberania. As guarnições tipicamente pequenas neste tipo de navio têm as suas próprias funções especializadas, como resgate, inspeção e combate. Um exemplo de um equipamento deste tipo de tecnologia é o motor *MAN VP185* de alto desempenho que está equipado com o *MAN*

SCR (Selective Catalytic Reduction). Trata-se de um sistema compacto e de pós-tratamento modular para gases de evacuação sendo uma tecnologia bastante testada e aprovada para obter uma redução de NOx até 90%.(MAN, n.d.)

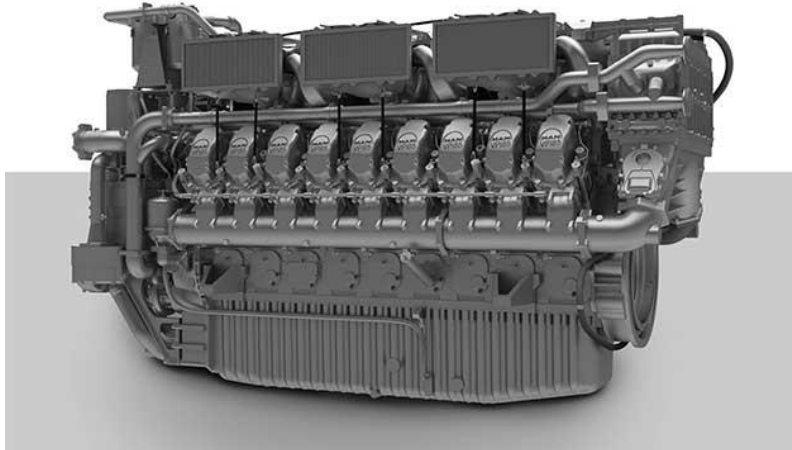


Figura 61-Motor MAN VP185(MAN PrimeServ Academy, n.d.)

6. Estudo de Implementação

A conceção de um navio de guerra deve ter, para além do estrito cumprimento dos requisitos operacionais, um conjunto de outros aspetos que, no caso deste trabalho, se centram no problema das emissões de partículas e compostos poluentes. A implementação de sistemas de prevenção ou minimização da poluição a bordo de unidades navais enfrentam desafios muito difíceis, nomeadamente limitações de espaço e peso, o problema logístico (nomeadamente no que se refere à opção por combustíveis cuja distribuição sofra ainda de limitações geográficas ou outras) e, naturalmente, os aspetos ligados à manutibilidade e fiabilidade de tais sistemas. Com efeito, a maioria dos navios de guerra em utilização, recorre a sistemas do tipo diesel ou diesel-elétrico. Inevitavelmente, as convenções sobre emissões gasosas poluentes irão, no futuro, ver estendida a sua obrigatoriedade aos navios de guerra, pelo que neste capítulo se apresenta um pequeno estudo, aplicado a uma unidade naval em uso na nossa Marinha, tendente a identificar as soluções possíveis e os respetivos constrangimentos. (Blatcher & Eames, 2013)

No projeto de um navio de guerra será pois, como tem vindo a ser afirmado é necessário ter em atenção, na seleção dos sistemas de propulsão, a redução de emissões. Em geral, a seleção de um sistema ou a sua conversão, deverá ter em conta os seguintes requisitos:

- Segurança;
- Tipo de combustível (Custo de combustível, as emissões de carbono e os consumos);
- Custos de instalação, manutenção e operação;
- Risco de implementação;
- Vulnerabilidade;
- Volume do sistema;
- Peso do sistema;
- Suporte logístico, operacional e os requisitos de manutenção;
- Adequabilidade ao perfil de utilização, ou seja, o ambiente operacional;
- A igualdade de sistemas entre navios diferentes.

O efeito da escolha de sistemas com elevadas temperaturas de gases de evacuação gerando uma grande assinatura infravermelha, é prontamente quantificável no que respeita à vulnerabilidade do navio.

O consumo de combustível, a manutenção e os custos operacionais, são também aspetos muito importantes a considerar, bem como o abastecimento do navio longe das suas bases.

Fatores como a importância do volume e peso do sistema são, por norma, avaliados, em conjunto, pois são fatores muito semelhantes na instalação de algum equipamento a bordo.(Blatcher & Eames, 2013)

Diferentes tipos de navios de guerra podem ser agrupados tendo em conta que, apesar das diferenças de projeto, podem desempenhar missões semelhantes, pelo que é necessário ter em conta a eficácia relativa dos diversos sistemas.

No caso em análise, foram avaliados, qualitativamente, custos e alguns riscos, já mencionados, que podem ser importantes para diferentes tipos de navios. A importância do volume, os requisitos logísticos e de peso variam significativamente entre diferentes tipos de navios. Os navios civis não têm estes problemas pelo que a escolha de um sistema propulsor satisfatório se torna mais difícil para navios de guerra.(Blatcher & Eames, 2013)

Nesta parte serão descritos quais os sistemas que são mais fiáveis na perspetiva militar, ou seja, será feita uma análise tendo em conta os exemplos dados no capítulo anterior, tendo em atenção os requisitos ambientais que hoje em dia estão em vigor e que se consideram viáveis e para uma futura instalação num navio da Marinha de Guerra Portuguesa.

6.1. Discussão de Viabilidade de Sistemas

Motores Nível III¹³

Cada vez mais esta geração de motores é produzida e comercializada, desde ferries, navios de pesca e até para navios com fins militares. As reduções de emissões dos motores são possíveis com novas tecnologias incorporadas internamente nos motores, soluções pós-tratamento ou diferentes tipos de combustível.

¹³ Nível III (Tier III) são os requisitos de emissões NOx de nível III da IMO.

No desenvolvimento de novas tecnologias para atender ao nível de emissão de nível III da IMO. Foram exploradas diferentes tecnologias para a redução de NOx, e algumas delas já foram implementadas nos motores marítimos.

Dando um exemplo, para um navio cruzeiro, que opera cerca de 40 % do tempo numa ECA, os custos do ciclo de vida são dados quando se mudam para motores Dual Fuel que operam, essencialmente, a LNG. Os inconvenientes seriam os tanques de combustível de maiores dimensões necessários e, sendo que para um navio de guerra o espaço tem de ser rentabilizado ao máximo, bem como a dependência de ter disponibilidade de postos de abastecimento espalhados pelo globo. Mas à medida que se constrói mais capacidade, a tendência está claramente a avançar para o LNG bem como uma opção válida para os restantes tipos de navios que operam nas ECA. Além disso, um motor DF é totalmente capaz de funcionar em qualquer combustível líquido no caso de não ser disponível o uso de LNG.(Wik & Niemi, 2016)

A utilização deste tipo de motores em navios de menores dimensões, a instalação destes motores para diminuir as emissões, tendo em conta que em norma estes motores são instalados juntamente com equipamentos de SCR e *Scrubbers*. O mesmo se aplica aos equipamentos que usam LNG necessário para o funcionamento de motores DF. De qualquer forma, a alternativa de motores a LNG parece ser a mais forte, pelo menos quando comparada com a exploração em MDO, que é o combustível claramente mais comum. Para que o LNG seja também uma opção muito mais atraente e que haja um maior investimento é necessário ainda haver um desenvolvimento, especialmente em estruturas de reabastecimento, para já a solução do uso de HFO como combustível juntamente com as tecnologias de SCR e *Scrubber* parecem ser as mais viáveis.(Wik & Niemi, 2016)

Vários fabricantes hoje em dias produzem sistemas de propulsão que conseguem colmatar as emissões de NOx de forma a cumprir os regulamentos da IMO. A Wärtsilä e a MAN, por exemplo, têm sistemas de pós-tratamento de emissões em que conseguem estar em conformidade com as políticas de emissões de NOx, como da IMO de nível III. Portanto torna-se uma medida atraente do ponto de vista da regulação de emissões por parte da tecnologia utilizada.(MAN Diesel & Turbo, 2012)

Navios a LNG

Tendo em conta o já mencionado, o primeiro sistema a ser analisado é o sistema a LNG. A utilização de LNG é bastante favorável em termos ambientais principalmente no que diz respeito à qualidade do ar, que é particularmente importante nos portos e áreas costeiras.

O LNG é uma opção que permite dar cumprimento aos requisitos pós 2020, e a sua utilização generalizada pode contribuir de forma significativa para a redução dos gases de efeitos de estufa em conformidade com os objetivos da IMO. (*Destaques - DGRM*, n.d.)

Contudo, converter um navio atual que utiliza combustível comum como o marine gasoil para LNG significa um grande investimento, isto quando comparado com a instalação de scrubbers ou utilização de combustíveis com um baixo teor de enxofre.

Nas construções de raiz a consideração e instalações a LNG apresentam diferença de preço não muito significativas, entre construtores. O custo da conversão do sistema é, portanto, a principal razão pela qual praticamente não são realizadas conversões para LNG em navios existentes., Contudo, cada vez mais cresce o número de navios novos operando a LNG. (*Destaques - DGRM*, n.d.)

Verifica-se também que a instalação de sistemas a LNG em navios tem revelado a necessidade de criação de rotas regulares, onde seja viável assegurar os respetivos fornecimentos. Assim, a massificação da utilização de LNG só será possível com uma eficaz cadeia de fornecimento que garanta a disponibilidade de pontos de abastecimento e a capacitação dos estaleiros com este tipo de tecnologia, ainda dominada por um reduzido número de grupos empresariais.

Pesquisas realizadas, sendo uma delas realizada no âmbito do projeto COSTA (*Consolidating Sea Turtle Conservation in the Azores*) referentes ao estudo das rotas Atlânticas dos Açores e Madeira e a realização de um plano de redução de emissões, em que se chegou à conclusão que, relativamente à autonomia, esta é um pouco desfavorável comparativamente com outros combustíveis devido a um maior consumo, revelou a grande necessidade de disseminação de postos de abastecimento e manutenção nas rotas marítimas. (*Pergunta escrita - Projeto COSTA - Rotas atlânticas para os Açores e a Madeira - P-003999/2014*, n.d.)

Para obter o custo do combustível anual para cada operação é necessário conhecer a taxa de consumo de combustível para cada motor. Essa taxa, que é dada em g/kWh é obtida nas fichas técnicas dos motores. Finalmente, o custo de combustível anual para cada operação será dado pela seguinte equação:

$$Custo = \frac{Pot \times \Delta t \times Tax \times Preço}{10^6}$$

Onde: *Pot* é a Potência gerada pelo motor, Δt são as horas destinadas àquela atividade, *Tax* é a Taxa de consumo de combustível do motor, dada em g/kWh, e o Preço de uma tonelada de combustível. (Souza, Gustavo Pereira Gomes de; Lira Júnior, José Claudino; Valença, 2017)

Apesar de existirem já navios militares instalados com este sistema, estes representam ainda uma pequena percentagem, talvez pela necessidade de grandes volumes de armazenamento do LNG que, em navios de guerra, constitui uma dificuldade dada a necessidade da máxima rentabilização do espaço ocupado tornando-se, este fator, um ponto desfavorável ou, muitas vezes, de não exequibilidade, em alguns navios.

Navios *Diesel-Electric*

O sistema *Diesel-Electric* têm, atualmente, um grande potencial de utilização pois é capaz de ter uma grande variedade de sistemas de controlo eletrónico. Por ser um sistema híbrido entre a propulsão diesel e a propulsão elétrica, o sistema híbrido é a combinação dos benefícios dos “dois mundos” de forma a uma maior eficiência.

A eficiência dos motores navais varia em função de vários fatores, tais como as ondas e o vento e também devido às alterações de velocidade durante uma determinada viagem. Com isto, o objetivo do sistema *Diesel-Electric* é tentar otimizar a eficiência tanto dos motores diesel, quanto dos geradores diesel tendo em conta os vários perfis operacionais do navio. Devido a maior complexidade do sistema de transmissão de potência ao propulsor, com a utilização de várias caixas reductoras, este tipo de sistema de propulsão fica sujeito à formação de ruídos e vibrações, aspetos mencionados anteriormente. (Souza, Gustavo Pereira Gomes de; Lira Júnior, José Claudino; Valença, 2017)

Apesar de não apresentar as vantagens de um sistema totalmente elétrico, o sistema híbrido é muito adaptável às circunstâncias, adaptando-se bem às situações que impliquem uma de alta necessidade de controlo de velocidade e segurança na operação e às situações onde só é necessária propulsão propriamente dita. Este sistema permite maior versatilidade na distribuição de carga, tendo em conta a otimização do consumo de combustível, durante o funcionamento dos motores e geradores que constituem o sistema. O funcionamento deste sistema consiste, na maior parte do tempo, na combinação de sistemas de produção de energia o que resulta numa maior eficiência energética e economia de combustível.(Souza, 2006)

Um sistema de propulsão *Diesel-Electric* é caracterizado por uma conversão da potência elétrica gerada a alta velocidade e baixo binário pelos motores diesel dos grupos eletrogéneos para regimes de baixa velocidade e elevado binário requeridos pelos motores elétricos que acionam os propulsores. Este sistema pode ter como configuração vários geradores ou motores elétricos, em que o número e o tamanho dos mesmos serão definidos conforme as finalidades e as necessidades do navio, assim como da disponibilidade de espaço e peso se porventura forem instalados de forma exequível.(Bastos, 2019)

Navios Elétricos

Os navios totalmente elétricos reúnem uma boa eficiência, flexibilidade, capacidade de sobrevivência e redução nos custos. Estas são as principais vantagens e as grandes melhorias, em comparação com um sistema de propulsão convencional.(Sauvé, 2016)

Mas apesar disto, os navios equipados com este tipo de sistema têm a sua energia armazenada em baterias pelo que a sua autonomia é necessariamente limitada. A propulsão elétrica consiste, portanto, num conjunto de baterias que fornece energia para um ou mais motores elétricos. Essas baterias são carregadas a partir de uma rede de energia quando o navio estiver atracado, mas também poderiam ser recarregadas a partir de painéis solares ou a partir de grupos eletrogéneos, ou, como nos modernos submarinos, a partir da eletricidade gerada em *Fuel Cells*, de hidrogénio e oxigénio, por exemplo. O volume e peso das baterias, a complexidade acrescida do sistema sem aparente vantagem acrescida, tornam este tipo de sistema inadequado para utilização em navios de superfície. Com isto, este sistema não seria o mais aconselhável a meios navais que realizem grandes

percursos, pois apesar da utilização crescente de baterias estas ainda não têm uma autonomia suficiente para serem equipados nestes navios. Os navios ideais para este tipo de sistema são aqueles em que operem a pequenas velocidades e que façam pequenos percursos.(Bastos, 2019)

Navios a Hidrogénio

A Opção pelo hidrogénio como combustível marítimo enfrenta alguns obstáculos significativos, como a necessidade de equipamento muito específico ou o seu alto custo. No entanto, comparado com outros combustíveis alternativos propostos, como o LNG, o hidrogénio tem algumas vantagens sendo muito superior na perspetiva ambiental.(Saito, 2018)

A nível energético, a energia específica deste tipo de combustível, é muito superior à de outros combustíveis. De acordo com a Comissão Europeia (CE), o conteúdo energético do hidrogénio é de 120 MJ/kg, o que é cerca de três vezes maior que o de outros combustíveis mais limpos, como mostra a Figura 62. Portanto, uma alta capacidade energética pode ser alcançada utilizando o hidrogénio como combustível.(Saito, 2018)

O hidrogénio pode ser considerado como um combustível alternativo, pois as tecnologias e redes de produção, armazenamento e transporte de hidrogénio já são bastante desenvolvidas, mas têm um alto custo. Embora o hidrogénio tenha algumas vantagens no uso prático, o custo do hidrogénio é significativamente grande. A razão pela qual o preço do hidrogénio é extremamente alto é que as infraestruturas para a sua produção, transporte e distribuição necessitam de uma tecnologia bem desenvolvida. O hidrogénio deve ser controlado e mantido sob alta pressão para ficar no estado líquido a temperaturas muito baixas e este processo é muito caro em comparação, como por exemplo, com o gás natural.(Saito, 2018)

Os tipos de *Fuel-Cells* que mais se utilizam mostram um espectro amplo de atributos. A seleção das tecnologias referentes a *Fuel-Cells* mais promissoras deve ser bem equacionada, em função dos diferentes tipos de navios levando a uma escolha das diferentes tecnologias, de forma a ser realizada uma ponderação dos diferentes dos parâmetros que devem ser postos em causa.(DNV GL - Maritime, 2019)

Como exemplo, a *Alkaline Fuel-Cell* (AFC) usa hidrogénio, os resíduos de produtos provenientes do processo industrial de produção de hidrogénio podem ser

utilizados como combustível para AFC's. Este tipo de *Fuel-Cell* é acoplado, em norma, com uma bateria o que poderá acrescentar um custo extra. A Phosphoric Acid Fuel-Cell (PAFC) e a Molten Carbonate Fuel-Cell (MCFC) podem ser considerados menos promissores para o uso marítimo comparativamente com outros tipos de células, devido às suas grandes dimensões. (DNV GL - Maritime, 2019)

O MCFC é utilizado normalmente combinado com sistemas de propulsão a LNG ou Diesel pois consegue fornecer uma maior potência a custos relativamente moderados. Testes realizados com este tipo de *Fuel-Cell* permitiram obter resultados em que, com o uso simultâneo de outros sistemas auxiliares de propulsão, se conseguem desenvolver as sssgrande potência necessária para a propulsão dos meios marítimos. MCFC's são usados em navios onde o tamanho da Fuel-Cell não é um fator limitativo, e onde as necessidades totais de energia são um requisito, de forma a que esta pode ser equipada em navios de carga ou embarcações de maiores dimensões. (DNV GL - Maritime, 2019)

O inconveniente da AFC é a elevada sensibilidade às impurezas, requerendo hidrogénio e oxigénio com alto teor de pureza, pelo que adicionam uma complexidade comercial na sua utilização e incorrem também em custos acrescidos. Se a purificação do hidrogénio puder ser resolvida a custos razoáveis, a AFC pode ser vista como um futuro candidato, oferecendo zero emissões, módulos bastante grandes, baixo custo da tecnologia e poucas questões especiais de segurança. (DNV GL - Maritime, 2019)

A Direct Methanol Fuel-Cell (DMFC) tem uma baixa eficiência, 20%, e assim não é considerada muito atraente para uso marítimo, onde a demanda de energia é relativamente elevada. (DNV GL - Maritime, 2019)

Os produtores de combustível convertem o combustível original em combustível composto com hidrogénio para utilização nas *Fuel-Cells*. Além do uso de hidrogénio, os produtores de combustível permitem a utilização de combustíveis tais como gás natural, metanol e gasóleo com baixos pontos de inflamação. (DNV GL - Maritime, 2019)

As *Fuel-Cells* trabalham num processo eletroquímico sem combustão. Só se ocorrer um processo de ignição, envolvendo uma pequena combustão de combustível, haverá emissão de carbono, conseqüentemente, este tipo de tecnologia reduzirá as emissões para o ar atmosférico. (DNV GL - Maritime, 2019)

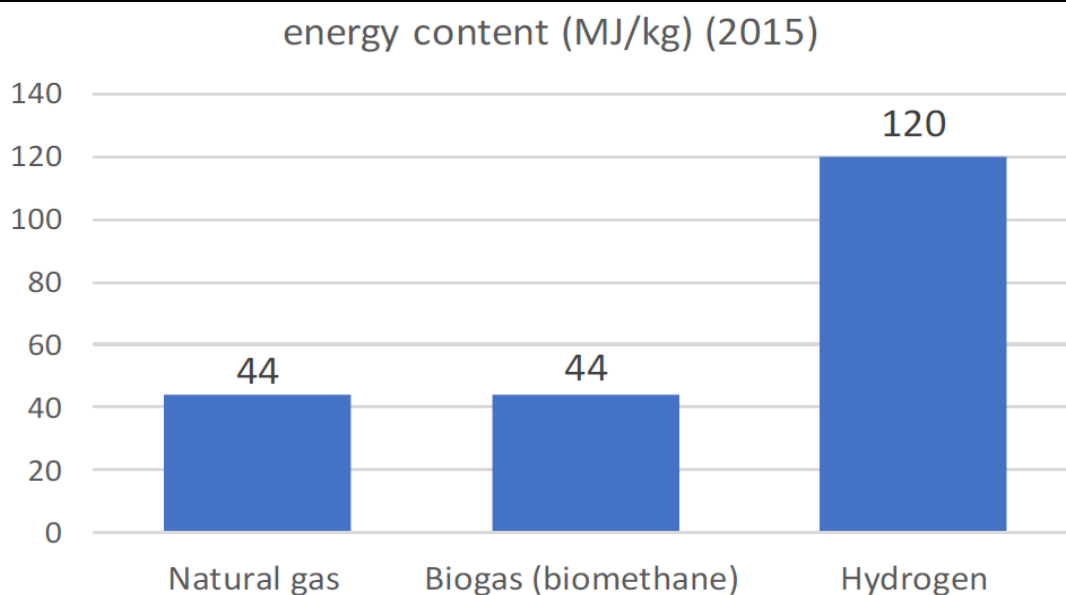


Figura 62- Comparação do teor de energia entre gás natural, biogás e hidrogénio(Saito, 2018)

Tecnologias de Redução de Emissões

As tecnologias mais utilizadas são os sistemas *Scrubber* e o *Selective Catalytic Reduction* (SCR) pois são os sistemas que têm como função tratar dos gases de evacuação. Este tipo de sistemas é compatível com a maioria das instalações propulsoras e equipamentos de um navio de guerra, não havendo uma acentuado decréscimo do rendimento ao nível da velocidade operacional ou até mesmo da autonomia, do que em comparação, por exemplo, nos sistemas a LNG.

Estes sistemas conseguem, portanto, diminuir as emissões de SO_x e NO_x sem afetar por completo a atividade operacional de um navio. No caso do sistema *Scrubber*, a utilização deste tipo de tecnologia resulta na acidificação da solução após a sua utilização no tratamento dos gases de evacuação e, esta ao ser encaminhada diretamente para o mar representa uma significativa poluição marinha local e problemas de acidificação oceânica. Armazenar este líquido de pós tratamento a bordo pode ser impraticável para um navio de guerra por razões de falta de espaço e, normalmente, a abordagem feita a este problema é a injeção de mais água de forma a neutralizar ao máximo a solução. (Blatcher & Eames, 2013)

Ao se usar um sistema *Scrubber* a utilização de água no tratamento dos gases de evacuação contribui também para a redução da assinatura de infravermelha do navio, mas em contrapartida, a assinatura acústica durante a operação também pode aumentar através do ruído mecânico associado ao uso de bombas para bombear essa mesma água. A

utilização destes sistemas num navio de grandes dimensões e mais complexo representa um custo considerável, mas que se o navio conseguir praticar uma velocidade que represente baixos consumos o seu uso levará a uma grande diminuição de emissões.(Blatcher & Eames, 2013)

Os sistemas SCR estão disponíveis e são comercializados por vários fabricantes, e foram adaptados com sucesso a uma ampla variedade de navios. Estes sistemas consistem numa tecnologia de remoção de NOx e apresentam um baixo nível de risco técnico. Assume-se que nos sistemas que tenham um tamanho considerável e moderadamente complexo, o catalisador represente um custo moderado a alto. Na utilização desta tecnologia ao se praticar uma velocidade a que correspondam altos consumos observar-se-á uma deterioração mais rápida do catalisador o que, provavelmente, conduzirá a altos custos de manutenção.(Blatcher & Eames, 2013)

No cômputo geral, estes sistemas são uma boa solução para instalação em navios de guerra pois não necessitam de um grande volume de instalação, mas se porventura estes equipamentos fossem instalados num navio de guerra, por vezes as emissões seriam maiores tendo em conta as mudanças de velocidade devido ao perfil operacional que estas embarcações têm de ter, pois esta tecnologia reduz as emissões tendo em conta a quantidade de gases gerada pelas instalações propulsoras, podendo haver uma maior emissão de gases se for necessário uma maior potencia para o funcionamento a velocidades mais altas, sendo necessário um aumento da eficiência tanto da tecnologia *Scrubber* como do *Selective Catalytic Reduction (SCR)*.

Análise Energética

Nesta secção calcula-se a análise de energia despendida em cada cenário de forma a ser possível compará-los. Como forma de comparação usaram-se dados técnicos do sistema de propulsão do navio de patrulha oceânica (NPO) da classe Viana do Castelo. As seguintes informações são referentes à utilização das duas linhas veios que constituem o sistema propulsor do NPO, de salientar que não se fará referencia aos consumos dos geradores e das caldeiras apesar destas terem um consumo relevante de combustível, apenas se salientam os gastos do sistemas propulsor.

Admitindo-se uma velocidade de cruzeiro correspondente a 15 nós, realizaram-se os cálculos da autonomia, mantendo-se uma reserva de combustível de 20% estabelecida, utilizando-se os dados referidos na Figura 63.

DESCRIÇÃO		MD BB	MD EB
Alavanca de comando		6,55	6,53
Velocidade média do navio	[Nós]	15,0	
Passo de hélice	[m]	2,6	2,6
Velocidade média de rotação do MD	[rpm]	720	720
Potência média no veio (P _v)	[kW]	956	919
Potência MD (P _d) ⁽¹⁾	[kW]	996	957
Medição de Combustível Alimentação	[L/10min]	405	331
Medição de Combustível Retorno	[L/10min]	354	284
Consumo Combustível	[L/h]	306	282
	[g/kWh]	257 ⁽²⁾	246 ⁽²⁾

Figura 63-Dados recolhidos nas provas de mar do NPO(SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf, n.d.)

Considerando-se a capacidade total de combustível do navio de 263 m³, determina-se a autonomia.

$$T = \frac{263 \times 10^3 \text{ m}^3}{(Q_{MD_BB} + Q_{MD_EB}) \times 24 \text{ horas}}$$

Sendo o T [dias] a autonomia e o Q_{MD_BB} [l/h] e Q_{MD_EB} [l/h] os caudais de combustível consumido dos motores de BB e EB, respetivamente.

$$T = 18,6 \text{ dias}$$

Com a margem de 20%: $18,6/1,2 = 15,5 \text{ dias}$

A partir do gráfico Velocidade/Potência podemos saber qual a potência total necessária para que o navio consiga manter a velocidade de 15 nós.

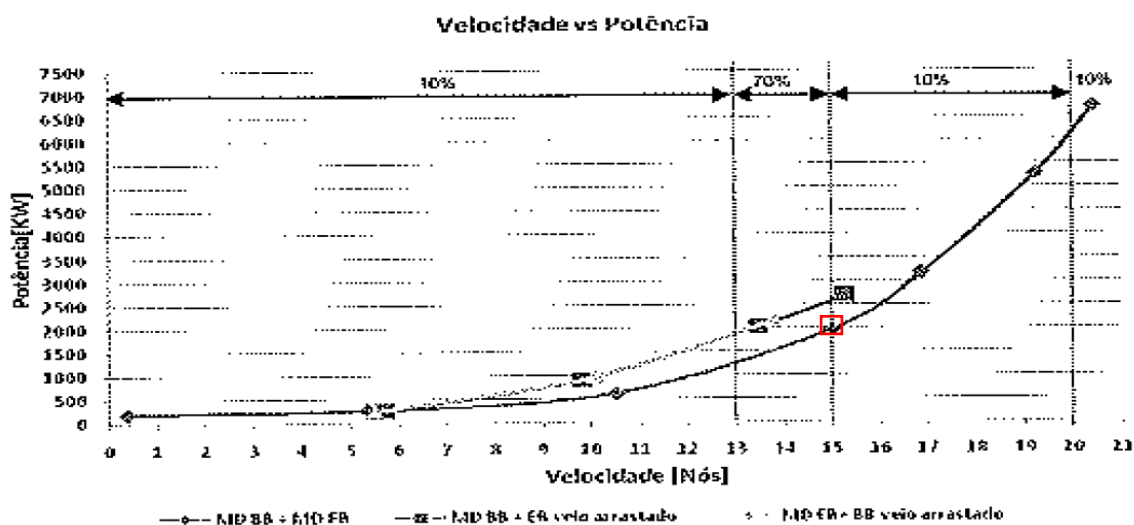


Figura 64-Gráfico Velocidade/Potência(SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf, n.d.)

Durante as provas de mar foram recolhidos dados para vários regimes, conforme o seu regime operacional.

Alavanca (2MD)		%	10	25	50	65	75	90	100
MD BB	RPM MD BB	rpm	509	519	519	720	836	999	1001
	Passo BB	°	1,8	9,9	23,3	24,9	25,5	25,0	27,9
	Consumo MD BB	l/h	84	96	138	306	480	684	906
	Potência MD BB	kW	94	126	309	996	1625	2488	3443
MD EB	RPM MD EB	rpm	509	519	519	720	836	999	1001
	Passo EB	"	2,0	9,9	23,1	24,9	25,4	25,5	27,6
	Consumo MD EB	l/h	72	72	108	282	468	738	850
	Potência MD EB	kW	94	128	293	957	1545	2790	3265
Potência Total		kW	187	254	602	1953	3170	5279	6708
Consumo Total		l/h	156	168	246	588	948	1422	1756
Velocidade Navio		Nós	0,4	5,4	10,5	15,0	16,9	19,2	20,4
Autonomia Dias ⁽¹⁾		Dias	49,5	47,0	35,2	16,8	10,8	7,4	6,0
Autonomia Distância ⁽¹⁾		Milhas	475	6058	8886	6040	4380	3400	2949

Figura 65- Tabela de dados recolhidos conforme perfil operacional(SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf, n.d.)

A partir dos dados recolhidos conseguimos obter a energia consumida a partir da potência necessária para que o navio se mantenha a 15 nós.

$$E = P \times n^{\circ} \text{ dias}$$

Sendo E [kWh] a energia consumida, P [kW] a potência despendida multiplicando pelo número de dias.

$$E = 1953 \times 15,5 \times 24 = 726\,516 \text{ kWh}$$

A energia consumida durante os 15,5 dias, mantendo uma reserva de combustível de 20%, é de 726 516 kWh.

Prontamente, realizar-se-á uma comparação com alguns outros sistemas de propulsão, tirando-se as conclusões conforme os resultados obtidos das energias de consumo de cada um, tendo em conta que terão de ter uma autonomia de 15,5 dias.

O sistema de propulsão LNG utilizado para comparação será o mesmo que o do navio da guarda costeira Finlandês, Turva. A velocidade de funcionamento deste tipo de motor é constante ou variável, sendo que se escolheu o modo de funcionamento com velocidade constante de forma a simplificar os cálculos, estando os dados representados no manual do fabricante. O motor em questão é o modelo da *Wärtsilä 12V34DF*.

Wärtsilä 12V34DF		DE AUX		DE AUX		ME		ME		ME	
		Gas mode	Diesel mode	Gas mode	Diesel mode	Gas mode	Diesel mode	Gas mode	Diesel mode	Gas mode	Diesel mode
Cylinder output	kW	480		500		500		480		500	
Engine speed	rpm	720		750		750		720		750	
Engine output	kW	5760		6000		6000		5760		6000	
Mean effective pressure	MPa	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2	
Speed mode		Constant		Constant		Constant		Variable		Variable	
IMO compliance		Tier 3	Tier 2	Tier 3	Tier 2	Tier 3	Tier 2	Tier 3	Tier 2	Tier 3	Tier 2

Figura 66-Tabela de dados de funcionamento do motor, *Wärtsilä 12V34DF* (Guide, n.d.)

Para se realizar os cálculos tomou-se como valor do motor principal com a maior velocidade de funcionamento, 750 rpm, e com o modo de funcionamento a gás.

Pressupôs-se, que o rendimento dos motores seria o mesmo para o sistema a LNG.

A partir da potência despendida para o navio navegar a 15 nós e com o consumo dos dois motores chegasse à quantidade de combustível consumidos por unidade de tempo sendo o poder calorífico total do combustível gasto e o consumo total de 0,503 g/KWh:

$$1953 \times 0,503 = 982,359 \text{ kg/h}$$

$$982,359 \times 15,5 \times 24 = 365\,437,576 \text{ kg}$$

Com o poder calorífico do combustível, aproximadamente de 12 kWh/Kg, conseguimos saber a energia armazenada nesta quantidade de combustível.

$$12 \times 365\,437,576 = 4\,385\,250,576 \text{ kWh}$$

A partir deste valor energético, conseguimos saber a quantidade necessária de LNG, utilizando o poder calorífico do LNG, 12,852 kWh/Kg.

$$N^{\circ} \text{ combustivel} = \frac{4\,385\,250,576}{12,852} = 341\,211,529 \text{ kg}$$

A densidade do LNG sendo diferente, tornará com que o seu volume de armazenagem seja também um pouco diferente. Calculou-se, portanto, o volume de LNG.

$$V (m^3) = \frac{M (Kg)}{\rho (Kg/m^3)} = \frac{341\,211,529}{580} = 588,3 m^3$$

O volume de LNG necessária seria de 588,3 m³ para que a energia gasta seja a mesma do que com o uso do atual combustível, não havendo espaço disponível de forma a instalar este volume de tanques no NPO.

Para o sistema de propulsão *Diesel-Electric* escolhido foi um sistema de propulsão utilizado em navios de patrulha e até mesmo navios offshore.

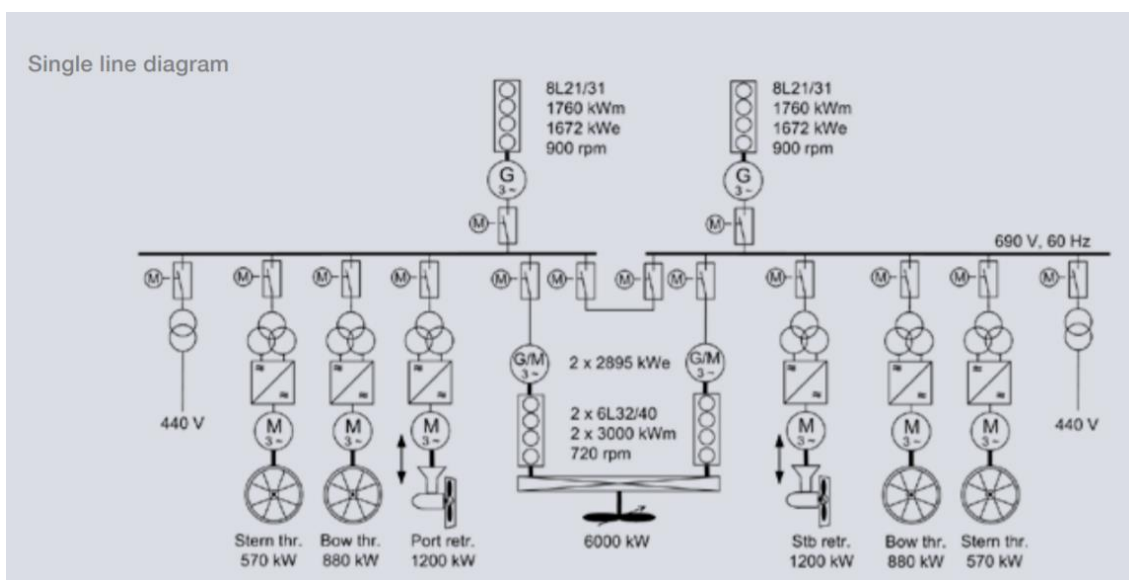


Figura 67-Diagrama do sistema *Diesel-Electric*(Diesel, n.d.)

Tendo em conta que a energia necessária para que o navio se mova à velocidade de 15 nós é a mesma sabendo também que tem de cumprir os requisitos a todas as velocidades, o combustível utilizado por este tipo de sistema é o mesmo do que o atual sistema do NPO, não havendo necessidade de calcular o volume dos tanques de combustível. A única análise aqui feita é, relativamente, à potência de saída total do sistema representada na Figura 67, sendo esta potência ultrapassada tendo em conta os componentes da MAN utilizados neste sistema *Diesel-Electric*.

A utilização de um navio com um sistema completamente elétrico não é muito viável tendo em conta que as baterias utilizadas hoje em dia não têm capacidade suficiente de autonomia de fazer grandes percursos. A sua utilização baseia-se, principalmente, em

ferries que devido as suas pequenas rotas não têm uma alta energia consumida, pelo que se torna mais rentável o seu uso neste tipo de embarcações.

Um exemplo de um navio com um sistema elétrico que usa baterias para armazenagem de energia é o caso do ferrie que faz uma rota entre a Dinamarca e a Suécia de apenas 4 km de distância, pelo que o seu conjunto de baterias perfaz um consumo energético de apenas 4160 kWh. (*Largest emission-free electric ferries for ForSea | ABB Marine & Ports - Marine References*, n.d.)

$$E = P \times n^{\circ} \text{ dias}$$

$$n^{\circ} \text{ dias} = \frac{4160}{1953} = 2,1 \text{ dias}$$

Fazendo uma análise da autonomia, tendo em conta a energia consumida chegamos à conclusão de que o número de dias é inferior em 13 dias ao do atual sistema de propulsão utilizado no NPO, sendo o uso de um sistema elétrico com recurso a baterias ainda um pouco remoto.

Fazendo o cálculo do número de baterias necessárias, tendo em conta a energia necessária para a autonomia de 15,5 dias e as especificações típicas das baterias, cada bateria tem uma capacidade energética de 565 kWh.

$$\frac{726\,516 \text{ kWh}}{565 \text{ kWh}} \approx 1286 \text{ Módulos Baterias}$$

Sendo necessário um conjunto de 1286 baterias para igualar a energia consumida atual de forma a igualar o número de dias de autonomia atual.

Os sistemas *Scrubber* são instalados nos sistemas de evacuação de gases de forma a regular as emissões de poluentes gasosos, tendo em conta que o uso de *Scrubbers* não influencia muito a potencia necessária para o funcionamento do motor, sendo que por vezes seja necessário despende uma maior potencia em alguns casos.

Relativamente aos *Scrubbers* usados para a comparação são da *Wärtsilä*, havendo várias dimensões pois existem vários tipos de motor com diferentes potências de trabalho.

Dim.	Description (Diameter A)	Ø850	Ø1050	Ø1250	Ø1450	Ø1650	Ø1850	Ø2050	Ø2250	Ø2450	Ø2650	Ø2850	Ø3050	Ø3250
	MW	1.2	1.9	2.7	3.6	4.7	5.9	7.2	8.7	10.3	12.0	13.9	15.9	18.1
	Gas flow (kg/S)	2.7	4.1	5.8	7.7	10.0	12.6	15.5	18.6	22.1	25.9	29.9	34.3	38.9
F	Total height (mm)	8,100	8,300	8,500	8,800	9,200	10,000	10,000	10,500	11,000	11,500	11,500	12,500	13,500
B	Overall length (mm)	950	1,150	1,350	1,550	1,750	1,950	2,150	2,350	2,550	2,750	2,950	3,150	3,350
B1	Overall width (mm)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	3,400
C	Outlet height (mm)	6,100	6,300	6,500	6,800	7,200	7,450	7,450	7,950	8,450	8,950	8,950	9,450	9,450
G	Footprint (mm)	1,240	1,440	1,640	1,840	2,040	2,240	2,440	2,660	2,900	3,120	3,380	3,600	3,850
E	Drain below base (mm)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,250
N1	Inlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1500	DN1500
N2	outlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1400
W1	Approx. dry weight (kg)	1,600	1,900	2,200	2,600	3,000	4,200	4,600	5,000	5,900	7,500	8,100	9,000	10,800
W2	Approx. operational weight (kg)	1,800	2,100	2,500	2,900	3,600	5,100	5,600	6,200	7,900	9,700	10,600	11,700	13,800

Figura 68- Tabela de várias dimensões de Scrubbers da Wärtsilä(Aflet, 2017)

Como existem vários tipos de Scrubbers, o que influencia a sua energia de consumo é o motor propriamente dito, pelo que não se torna vulgar realizar este cálculo.

6.2. Análise Dimensional

As dimensões são sempre um fator a ter em conta pois, como já referido anteriormente, o espaço tem de ser o mais rentabilizado possível no desenvolvimento de um navio de propósitos militares. Nesta parte serão assinaladas as dimensões da instalação propulsora atual do NPO com o auxílio a um software, DWG View.

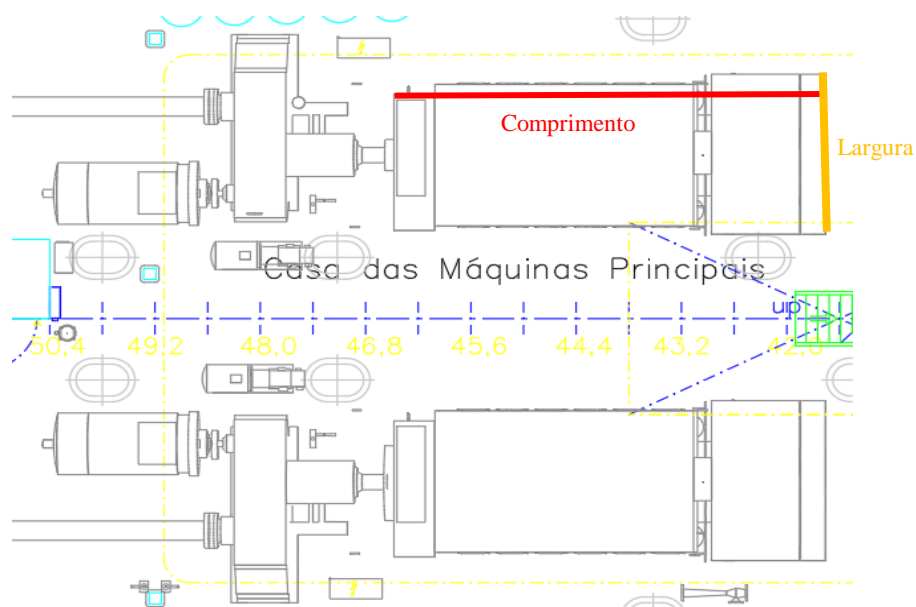


Figura 69-Casa das Máquinas do NPO(SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf, n.d.)

O comprimento máximo é de 4912,5 mm e a largura máxima de 2000,0 mm.

O motor que usa LNG da Wärtsilä 12V34DF tem as seguintes dimensões, representadas na Figura 70.

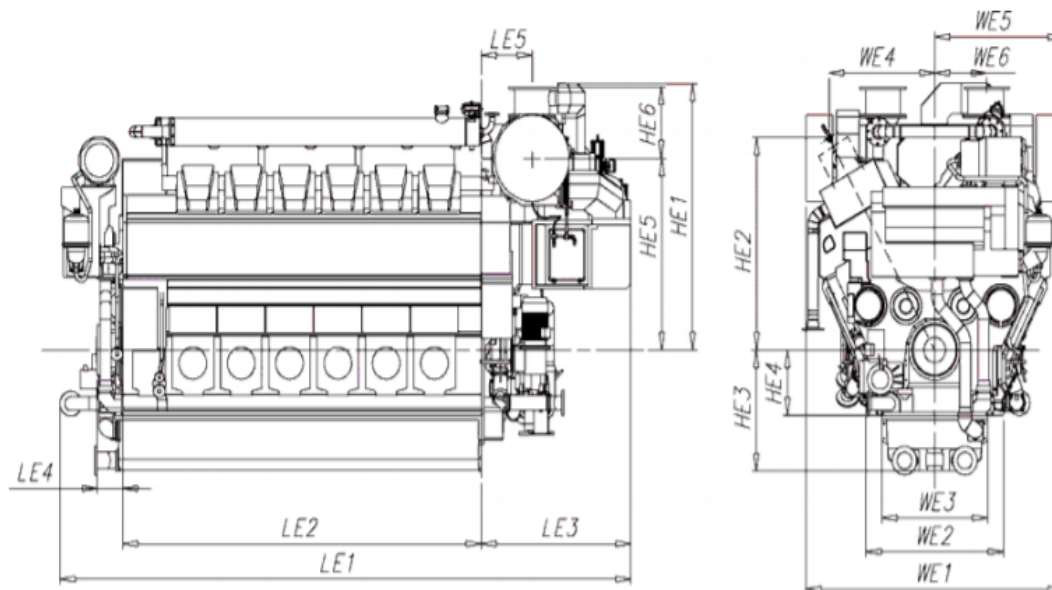


Figura 70- Esquema do motor, Wärtsilä 12V34DF(Guide, n.d.)

O comprimento do motor, representado em LE1 é 6865 mm, e a largura, WE1 é 2900 mm. A dimensão que dificultaria a sua escolha de instalação seria o comprimento pois este tem um valor bastante acima do atual motor. De referir que seria necessário um espaço adicional para os tanques de armazenamento do LNG, sabendo que este tem de ser mantido a -160°C para se manter no estado líquido.

No sistema *Diesel-Electric* apresentado anteriormente, primeiramente o 6L32/40 da MAN representado na Figura 71.



Figura 71- Motor MAN 6L32/40(6L32/40 / Engine Family, n.d.)

O comprimento do motor 6L32/40 é 5940 mm, e a largura de 2630 mm.

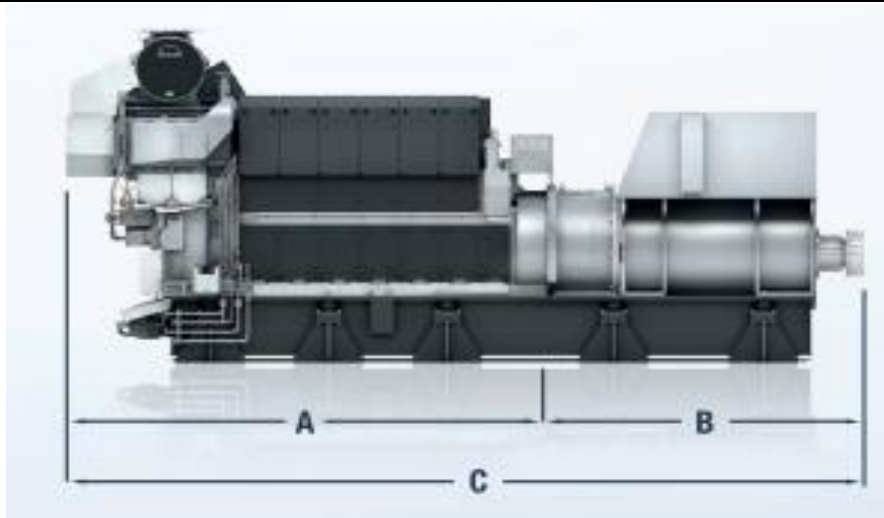


Figura 72- Motor MAN 8L21/31(Marine, n.d.)

Na Figura 72 está representado o outro modelo do modelo que constitui o sistema *Diesel-Electric*, tendo de comprimento de 7682 mm e largura de 1400 mm.

Sendo este um sistema *Diesel-Electric* é necessário ter em conta a maquinaria de conversão, neste caso de conversão para energia elétrica através dos motores diesel. Este tipo de sistema é constituído por um sistema de geradores de operação PTO/PTI, esta tecnologia de geradores PTO/PTI é composta por duas unidades, motores de indução e um sistema de gestão de energia, havendo uma grande variedade de dimensões.

Relativamente ao sistema completamente elétrico em que se fez mais ênfase o método de baterias como forma de armazenagem de energia, o tipo de módulos de baterias utilizados está representado na Figura 73.



Figura 73-Módulo de baterias da ABB(*Containerized energy storage systems Complete battery storage systems for retrofit and newbuilt vessels*, n.d.)

Este tipo de módulos não seria a instalação mais viável pois seriam necessários, aproximadamente, de 1286 módulos de baterias. Estes módulos têm as seguintes dimensões, 6050 x 2862 x 3100 mm, e um peso de 23 000 Kg.

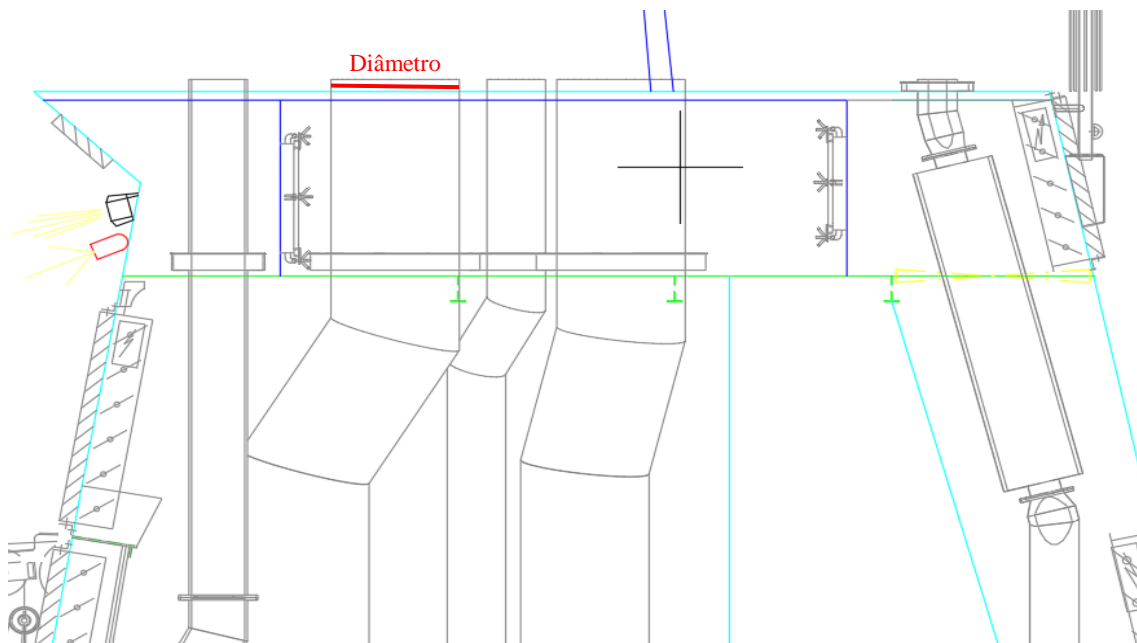


Figura 74-Parte do sistema de evacuação do NPO(SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf, n.d.)

O sistema Scrubber é um sistema bastante “moldável” visto que a sua estrutura tubular apenas interfere com o sistema de evacuação de gases. O diâmetro representado tem 711 mm, não havendo uma medida que esteja na gama deste diâmetro representado na Figura 68, a sua instalação é bastante diversificada podendo haver variações nos seus tamanhos originais, contudo, é necessário ter em conta a potência que o motor consegue despender pois é o principal fator que influencia a sua escolha.

7. Conclusão

A entrada em vigor dos novos regulamentos da IMO terá consequências económicas, operacionais e financeiras em todo o sector marítimo, mas também em todas as Marinhas de Guerra. Esses regulamentos serão muito mais restritivos em termos de emissões nas zonas de controlo de emissões (ECA), de maneira a colmatar este tipo de poluição os meios navais terão de ter os meios necessários de forma a reduzir essas emissões provenientes, essencialmente, da combustão de combustíveis fósseis.

Ao longo de vários anos foram realizados vários encontros de modo a debater as preocupações causadas pela poluição proveniente das emissões libertadas pelos navios para a atmosfera, em que causam vários problemas de saúde, principalmente, em populações situadas em territórios costeiros.

A Convenção MARPOL adicionou uma nova legislação relativa à política de emissões por parte dos navios, o anexo VI. O anexo VI tem como principais funções e contribuições para a proteção do meio marinho contra a poluição por navios e a necessidade de melhorar a prevenção e controlo da poluição.

A melhor maneira de atenuação deste tipo de poluição é a utilização de tecnologia que consiga reduzir as emissões poluentes ou até mesmo o uso de combustível que tenha menores concentrações de constituintes que, após a combustão ao serem libertados para a atmosfera são nocivos para o meio ambiente, um desses exemplos de poluentes libertados são os óxidos de enxofre (SO_x).

Numa possível implementação de uma tecnologia descrita no Capítulo 3 num NPO no futuro, com a mesma exigência de diminuição de emissões, o sistema *Scrubber* apresenta notáveis vantagens, superiores do que as restantes tecnologias. Tendo em conta que a instalação de um sistema *Scrubber* é muito mais simples e com menores encargos financeiros, não ocupando tanto espaço do que em comparação, por exemplo, o sistema LNG que necessitaria de tanques de armazenamento muito maiores dos que atualmente incorporados no NPO.

Em suma, de forma a se chegar a esta conclusão foi necessário realizar uma análise energética e dimensional dos sistemas de propulsão e das tecnologias com a capacidade de reduzirem as emissões, chegando à conclusão já referida, o sistema *Scrubber* é o mais viável de instalação num navio da Marinha de Guerra Portuguesa.

De modo a ser possível prosseguir com o desenvolvimento de estudo aconselharia um estudo mais pormenorizado das capacidades do sistema *Scrubber*, ou seja, desenvolver um estudo de emissões deste sistema e realizar uma comparação com os outros sistemas, realizar uma avaliação de custos e implementação do sistema.

Bibliografia

- 6L32/40 | *Engine Family*. (n.d.). Retrieved July 13, 2020, from <http://diesel-family.com/6l32-40/>
- Ådnanes, A. K. (2003). *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion*.
- Aflet, P. L. E. (2017). *Wärtsilä I-SOx scrubber system I-SOx scrubber system design*.
- Ajioka, Y. (2013). *Electric Propulsion Systems for Ships*. 62(3), 231–232.
- Ammar, N. R., & Seddiek, I. S. (2018). Thermodynamic, environmental and economic analysis of absorption air conditioning unit for emissions reduction onboard passenger ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62(May), 726–738. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.05.003>
- Basaran, I. (2016). *The Evolution of the International*. 47(1), 101–118.
- Bastos, R. F. (2019). *POTENCIAL DO SISTEMA DIESEL ELÉTRICO PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL EM EMBARCAÇÕES DE PESCA: UM ESTUDO DE CASO DO CONSUMO DE ENERGIA DA FROTA DE ESPINHEL DE FUNDO DO RIO DE JANEIRO* (Vol. 4, Issue 1). <https://doi.org/.1037//0033-2909.I26.1.78>
- Biert, L. Van, Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). Review article A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327(X), 345–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- Blatcher, D. J., & Eames, I. (2013). Compliance of Royal Naval ships with nitrogen oxide emissions legislation. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1), 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.010>
- British aircraft carrier Queen Elizabeth aborts sea trial after ‘major leak’, report says* | *South China Morning Post*. (n.d.). Retrieved April 21, 2020, from <https://www.scmp.com/news/world/europe/article/3018117/hms-queen-elizabeth-uk-aircraft-carrier-aborts-sea-trial-after>
- Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., & Brown, R. J. (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship

emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70(April), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>

Comissão das Comunidades Europeias. (2018). *Comunicação Da Comissão Ao Conselho E Ao Parlamento Europeu*. <http://www.indicators.odysseemure.eu/decomposition.html>

Containerized energy storage systems Complete battery storage systems for retrofit and newbuilt vessels. (n.d.).

Convenção STCW / FOR-MAR. (n.d.). Retrieved March 28, 2020, from <http://www.for-mar.pt/cursos/convencao-stcw/>

Convention on the International Maritime Organization. (n.d.). Retrieved March 25, 2020, from <http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/Convention-on-the-International-Maritime-Organization.aspx>

CROE Marine Exhaust Scrubbers for MARPOL Compliance. (n.d.). Retrieved March 30, 2020, from <https://www.croceanx.com/cr-ocean-engineering-marine-exhaust-gas-scrubbers-marpol-compliance-without-high-fuel-prices/>

Dalsøren, S. B., Eide, M. S., Endresen, Ø., Mjelde, A., Gravir, G., & Isaksen, I. S. A. (2009). *and Physics Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships : the contribution from major ship types and ports*. 2171–2194.

DDG 1000 Zumwalt Class - Multimission Destroyer - Naval Technology. (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from <https://www.naval-technology.com/projects/dd21/>

Destaques - DGRM. (n.d.). Retrieved June 15, 2020, from <https://www.dgrm.mm.gov.pt/destaques?articleId=349996>

Dienstantritt für die erste „F 125“ ab Mai - THB. (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from <https://www.thb.info/rubriken/single-view/news/dienstantritt-fuer-die-erste-f-125-ab-mai.html>

Diesel, M. A. N. (n.d.). *Hybrid Propulsion*.

DNV GL - Maritime. (2019). *Assessment of Selected Ternative Fuels and*

Technologies. *Imo*, 391(June), 1–48.

[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.391\(95\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.391(95).pdf)

Electric Propulsion System for Ship: Future in the Shipping? (n.d.). Retrieved May 8, 2020, from <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/electric-propulsion-system-for-ship-does-it-have-a-future-in-the-shipping/>

Europeu, P., Peia, E.-, Europeu, P., & Europeu, P. (2006). *I Do Artigo 175*. 2006, 52–59.

Exhaust Gas Recirculation (EGR), NOx and particulate measurement | Cambustion. (n.d.). Retrieved May 13, 2020, from <https://www.cambustion.com/products/egr>

Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., & Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships : A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30–54.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>

Georgescu, C., & Mamut, E. (2004). *A STUDY CONCERNING THE POSSIBILITIES FOR USING FUEL CELLS*. 51(July), 49–56.

Gómez, M. R., & Baaliña, A. Á. (2017). Review of propulsion systems on LNG carriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(January), 1395–1411.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.095>

Guide, P. (n.d.). *Wärtsilä 34DF* © Copyright by WÄRTSILÄ FINLAND Oy.

Harsema-mensonides, A. (2006). *Dual Fuel Electric Propulsion Systems in LNG Shipping*. 1–9.

Hebbar, G. S., & Bhat, A. K. (2012). *Control of NO x from A DI Diesel Engine With Hot EGR And Ethanol Fumigation : An Experimental Investigation*. 2(7), 45–53.

History of IMO. (n.d.). Retrieved March 25, 2020, from <http://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). (n.d.). Retrieved April 2, 2020, from <http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International>

-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx

Kahila, H., Wehrfritz, A., Kaario, O., & Vuorinen, V. (2019). Large-eddy simulation of dual-fuel ignition : Diesel spray injection into a lean methane-air mixture.

Combustion and Flame, 199, 131–151.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.10.014>

Karim, S. (2010). *OF INTERNATIONAL Implementation of the MARPOL Convention in Developing Countries*. <https://doi.org/10.1163/157181010X12668401899110>

Kordesch, K. V., & Simader, G. R. (1995). *Environmental Impact of Fuel Cell Technology*. 191–207.

Largest emission-free electric ferries for ForSea | ABB Marine & Ports - Marine References. (n.d.). Retrieved July 3, 2020, from

<https://new.abb.com/marine/marine-references/forsea>

Laval, A., & Combustion, G. (n.d.). *Gas Combustion Unit*.

Leeuwen, J. Van, & Kern, K. (2013). *The External Dimension of European Union Marine Governance : Institutional Interplay between the EU and the International Maritime Organization*. February, 69–87.

LNG as a Shipping Fuel in Northern Europe | Global Maritime Hub. (n.d.). Retrieved April 29, 2020, from <https://globalmaritimehub.com/articles/lng-as-a-shiping-fuel-in-northern-europe>

López, F. de M. (2015). *Evaluación de las Consecuencias de la Nueva Regulación de la OMI sobre Combustibles Marinos*.

MAN. (n.d.-a). Emission project guide. *MAN Energy Solutions*, 111.

[https://marine.man-](https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf)

[es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf](https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf)

MAN. (n.d.-b). *Reliable high-power engine solutions*.

MAN Diesel & Turbo. (2012). *Tier III Two-Stroke Technology*. 36.

MAN PrimeServ Academy. (n.d.). Retrieved June 4, 2020, from <https://uk.man-es.com/products-services/vp185>

Marine, S. (n.d.). *Man 121/31*.

Miller, B. G., & Systems, E. (2017). *Selective Non-Catalytic Reduction Emissions Control Strategies for Power Plants Formation and Control of Nitrogen Oxides*.
x.

Mokale, A., & Prabhuajgaonkar, P. (n.d.).
Fuel_Cells_For_ELECTRIC_VEHICLE_PROPULS.

Naval Analyses: Bergamini class (FREMM) frigates of the Italian Navy. (n.d.).
Retrieved April 20, 2020, from
<https://www.navalanalyses.com/2014/08/bergamini-class-fremm-frigates-of.html>

Notteboom, T. (2010). Analysis of the Consequences of Low Sulphur Fuel Requirements. *Report Institute of Transport and Marine Management Antwerp, January*, 1–83.

Orçamento de defesa dos EUA poderá sofrer grandes cortes no orçamento nos próximos anos - Meta-Defense.fr. (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from
<https://www.meta-defense.fr/pt/2020/05/05/O-orcamento-de-defesa-americano-poderá-sofrer-grandes-cortes-no-orcamento-nos-próximos-anos/>

Organizações Internacionais relacionadas com a atividade do Instituto Hidrográfico. (n.d.). Retrieved March 30, 2020, from <https://www.hidrografico.pt/info/8>

Our stories - Hybrid propulsion for naval vessels –Rolls-Royce. (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/insights/2018/richard-partridge-on-hybrid-propulsion-for-naval-vessels.aspx>

Pages - default. (n.d.). Retrieved April 20, 2020, from
<https://www.public.navy.mil/surflant/ddg51/Pages/default.aspx>

PCBs | Ambiente | SGS Portugal. (n.d.). Retrieved April 4, 2020, from
<https://www.sgs.pt/pt-pt/environment/soil/laboratory-analysis/specialty-analyses/pcbs>

Pergunta escrita - Projeto COSTA - Rotas atlânticas para os Açores e a Madeira - P-003999/2014. (n.d.). Retrieved June 15, 2020, from
<https://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+WQ+P-2014-003999+0+DOC+XML+V0//PT>

- PERSONAL PROFILE* | Colin de la Rue. (n.d.). Retrieved March 30, 2020, from <http://www.colindelarue.com/personal-profile/>
- Prabhu, S. (2018). *A Review on Selective Catalytic Reduction (SCR) -A Promising Technology to mitigate NO x of Modern Automobiles*. 13(1), 5–9.
- Pros and cons of low sulfur fuel - FreightWaves*. (n.d.). Retrieved May 13, 2020, from <https://www.freightwaves.com/news/pros-and-cons-of-low-sulfur-fuel>
- Range, P. (n.d.). *Powering the world ' s navies Powering the world ' s navies*.
- Reduction, S. C., Device, C., Pollutants, A., Oxides, N., Limits, A. E., Type, A. S., Typical, P., Applications, I., Characteristics, E. S., Size, C. U., States, U., Nox, T., Scr, T., Loading, P., Nox, H., & Considerations, O. (2002). *Air Pollution Control Technology Fact Sheet*. 1–5.
- Rousseau, G. (2019). Ecodesign for warships. *OCEANS 2019 - Marseille*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/oceanse.2019.8867493>
- Rulefinder, R., Convention, I., Amended, S., Mepc, R., Mepc, R., & Mepc, R. (2009). *MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships Amended by Resolution MEPC . 111 (50) Amended by Resolution MEPC . 115 (51) Amended by Resolution MEPC . 116 (51) Articles of the International Convention for the Preventio. 111(50)*, 1–584.
- Saito, N. (2018). *The Maritime Commons : Digital Repository of the World Maritime The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies The Economic Analysis of Commercial Ships with Hydrogen Fuel Cell through Case Studies*.
- SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora.pdf*. (n.d.).
- Sauvé, L. R. R. A. (2016). *JCSP 42 Service Paper PCEMI 42 Étude militaire ELECTRICAL PROPULSION : THE FUTURE IN WARSHIP*.
- Seddiek, I. S., & Elgohary, M. M. (2014). Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SOx and NOx emissions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 737–748. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0209>

- Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) System – BDEnergySystems.* (n.d.). Retrieved May 10, 2020, from <http://www.bdenergysystems.com/product/snrcr-systems-2/>
- Sentís, D. D. (2012). *Feasibility of Dual - Fuel Engines in Short Sea Shipping Lines.*
- Siemens AG. (2009). *SINAVY PEM Fuel Cell for Submarines.*
<http://www.industry.usa.siemens.com/verticals/us/en/marine-shipbuilding/brochures/Documents/SINAVY-PEM-Fuel-Cell-en.pdf>
- Souza, Gustavo Pereira Gomes de; Lira Júnior, José Claudino; Valença, D. P. (2017). *No Title.* 9, 92–104.
- Souza, F. A. C. de. (2006). *Avaliação de Sistemas Diesel Elétrico, Mecânico e Híbrido para embarcações de Apoio a Plataformas.*
- Submarino Tridente em reparação no Alfeite | Cibersul.* (n.d.). Retrieved April 22, 2020, from <https://www.cibersul.org/submarino-tridente-em-reparacao-no-alfeite/>
- The, S., Journal, A., & Apr, N. (2015). *CONVENTION DOCUMENTS.* 53(2), 516–531.
- Torrey Canyon: The world's first major oil tanker disaster - SAFETY4SEA.* (n.d.). Retrieved March 30, 2020, from <https://safety4sea.com/cm-torrey-canyon-the-worlds-first-major-oil-tanker-disaster/>
- Tronstad, T., & Langfeldt, L. (n.d.). *STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING EMSA European Maritime Safety Agency Summary of Identified Gaps.*
- Tupper, E. C. (2013). Ship Types. In *Introduction to Naval Architecture* (Fifth Edit). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-098237-3.00015-1>
- US Energy Information Administration. (2015). *Marine Fuel Choice for Ocean- Going Vessels within Emissions Control Areas.* June, 73.
https://www.eia.gov/analysis/studies/transportation/marinefuel/pdf/marine_fuel.pdf
- VI, A., & Da, R. (2010). *Regras para a Prevenção da Poluição do Ar Causada por Navios.* 78(58), 1–41.
- Wärtsilä 34DF.* (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>

- Wells, P. G. (2017). The iconic Torrey Canyon oil spill of 1967 - Marking its legacy. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2), 1–2.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.013>
- Wik, C., & Niemi, S. (2016). Low emission engine technologies for future tier 3 legislations - options and case studies. *Journal of Shipping and Trade*, 1(1), 3.
<https://doi.org/10.1186/s41072-016-0009-z>
- Yade, P., Sarkar, J., & Tambat, M. (2014). *Review of Fuel Cell Based Electric Vehicle ' S Propulsion System*. 8354(3), 171–177.
- Yang, B., Sun, P., Huang, L., & Song, D. (2013). *The Prospective Analysis of Marine Dual Fuel Engine Application Based on Emission and Energy Efficiency*. X, 1975–1980. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.1975>