

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS - APMA.1/2020

WILLIAM MONTORSE DE ARVELOS

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

RIO DE JANEIRO

2020

WILLIAM MONTORSE DE ARVELOS

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

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

Orientador: Elizabeth Borges Lourenço

RIO DE JANEIRO

2020

WILLIAM MONTORSE DE ARVELOS

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

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

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Elizabeth Borges Lourenço

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Assinatura do Aluno

Dedico este trabalho a todos meus companheiros de profissão que enfrentam diariamente as desafiadoras jornadas de trabalho com contentamento e o orgulho de fazer parte da nossa nobre Marinha Mercante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Ludmilla pelo apoio em todos os momentos importantes de minha vida pessoal e profissional. Que eu possa algum dia, retribuir toda a paciência, o carinho, o suporte psicológico que você me proporcionou nos dias de ausência e isolamento que minha profissão acarreta.

Agradeço aos meus pais Jorge e Maria Aparecida, pelo constante amor, afeto e também pelos ensinamentos e a forma de encarar a vida com humildade, otimismo e fé. Cada realização e conquista durante meu caminho foram inteiramente reflexo dos esforços e sacrifícios que se submeteram em meu benefício.

Agradeço aos meus irmãos de sangue, Henrique e Ramon, e também aos meus amigos por sempre proporcionar momentos felizes não apenas nos dias bons, mas também durante os dias difíceis.

Agradeço aos profissionais de saúde que se comprometeram e ajudaram tanto as pessoas durante esse período de pandemia. Muitos se sacrificaram pelo bem comum e prestaram o auxílio que os familiares não puderam. Vocês trouxeram conforto aos doentes e necessitados e mostraram o real significado de humanidade ao mundo.

Aprender é a única coisa que a mente nunca
não se cansa, nunca tem medo e nunca se
arrepende.
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

A propulsão é um elemento primordial para a embarcação, visto que é responsável pelo seu deslocamento e manobrabilidade nos rios e mares. Atualmente, no mercado da indústria naval, é possível encontrar diferentes sistemas que visam atender aos mais variados critérios operacionais presentes no cotidiano da Marinha Mercante. Esta monografia descreve os principais sistemas de propulsão presentes em nossas embarcações com o objetivo de expor as características e qualidades específicas de cada uma delas e compara-las. Com informações adquiridas por fabricantes de grande reputação na área marítima, foi possível traçar análises e concluir que as vantagens de cada tipo de propulsão dependem do perfil da navegação e das exigências das regulamentações sobre emissões da Organização Marítima Internacional. A propulsão mecânica se destaca pela capacidade de produzir grandes forças de empuxo para deslocamento, a propulsão elétrica é referenciada em manobrabilidade e economia de combustível e a propulsão híbrida soluciona questões de flexibilidade envolvendo embarcações com operações diversificadas.

Palavras-chave: Propulsão Mecânica. Propulsão Elétrica. Propulsão Híbrida.

ABSTRACT

Propulsion is an essential element for the vessel, since it is responsible for its thrust and maneuverability on rivers and seas. Currently, in the shipbuilding market, it is possible to find different systems that aim the operational variety. This work describes the different propulsion systems present in our vessels in order to expose the specific characteristics and qualities of each one of them and make a comparison. With information from renowned manufacturers in the maritime business, it was possible to analyze and express the advantages of each type of propulsion according to the navigation profile and the emission regulations of the International Maritime Organization. Mechanical propulsion stands out for its ability to produce great thrust forces, electric propulsion is very efficient in maneuverability and fuel economy and hybrid propulsion solves flexibility issues involving vessels with diversified operations.

Keywords: Mechanical Propulsion. Electric Propulsion. Hybrid Propulsion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	Embarcações da navegação de cabotagem e longo curso	14
Figura 2:	Embarcações do Apoio marítimo	15
Figura 3:	Embarcações do apoio portuário	16
Figura 4:	Principais componentes do sistema diesel mecânico	18
Figura 5:	Demonstração do uso da caixa redutora em motores 4 tempos e 2 tempos	19
Figura 6:	Esquema de configuração de uma planta diesel mecânica	20
Figura 7:	Exemplo dos componentes básicos de uma propulsão diesel elétrica	21
Figura 8:	Exemplo de um esquema de barramento de propulsão diesel elétrica	22
Figura 9:	Demonstração dos componentes de um sistema híbrido	23
Figura 10:	Exemplo de um esquema de configuração para propulsão híbrida	24
Figura 11:	Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo gerador	25
Figura 12:	Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo diesel mecânico	25
Figura 13:	Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo diesel elétrico	26
Figura 14:	Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo <i>booster</i>	27
Figura 15:	Tipos de operações envolvendo sistema híbrido	27
Figura 16:	Comparação entre FPP e CPP	29
Figura 17:	Relação entre carga e eficiência	30
Figura 18:	Consumo de combustível por KW gerado	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Arqueação Bruta
AHTS	Navio de Suprimento, Reboque e Manuseio de Âncoras
CPD	Centro de Processamento de Dados
CPP	Propulsão de Passo Controlável
DP	Posicionamento Dinâmico
ECA	Área de Controle de Emissão
FPP	Propulsão de Passo Fixo
IMO	Organização Marítima Internacional
MARPOL	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navio
MCP	Motor de Combustão Principal
NECA	Área de controle de Emissão Relacionada Óxido de Nitrogênio
ORSV	Navio de Recuperação de Derramamento de Óleo
OSV	Embarcação de Serviço Offshore
PLSV	Navio de Lançamento de Linhas Submarina
PSV	Navio de Apoio a Plataforma
PTI	Motor elétrico de Propulsão
RPM	Rotação Por Minuto
RSV	Navio com Operação de Robô Submarino

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂	Dióxido de Carbono
NO_x	Óxido de Nitrogênio
SO_x	Óxido de Enxofre
NH₃	Amônia
KW	Kilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	ATUAÇÃO DA MARINHA MERCANTE NACIONAL	13
2.1	Navegação de cabotagem e navegação de longo curso	13
2.2	Navegação de apoio marítimo	14
2.3	Navegação de apoio portuário	14
3	SISTEMAS DE PROPULSÃO	16
3.1	Sistema de Propulsão Diesel Mecânico	17
3.2	Sistema de Propulsão Diesel elétrico	19
3.3	Sistema de Propulsão Híbrido	21
4	ANALISE DE EFICIENCIA DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO	27
4.1	Velocidade de operação dos propulsores	27
4.2	Carga de operação dos Motores	28
4.3	Partida automática dos motores	29
4.4	Custos de instalação	30
4.5	Impacto ambiental	31
4.6	Comparação entre ossistemas de propulsão	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

Desde a consolidação das primeiras civilizações foram utilizadas pequenas embarcações nos mares e rios para transporte de mercadorias e pessoas. A navegação contribuiu muito, não apenas para disseminação da cultura e expansão do comércio, mas também para avanços na área da ciência e técnicas de engenharia, como mostram os registros históricos. No cenário atual cerca de 90% do comércio mundial é realizado através do transporte aquaviário. Este modal, juntamente com outras atividades marítimas, mostra que jamais perdeu visibilidade no globo e persiste confirmando, ano após ano, um enorme impacto na economia das nações.

O uso da força de propulsão permite a manobrabilidade de um corpo sobre ou sob a água. Essa força é a responsável por fazer a embarcação vencer as barreiras naturais durante a navegação (vento, correntes, ondas, atrito). Inicialmente existiam um número limitado de sistemas de propulsões que incluíam os mais rudimentares. Atualmente, mesmo após a sofisticada modernização das embarcações, ainda se tem consistentes e bem sucedidas inovações tecnológicas aplicadas a navegação.

A constante evolução da engenharia e da tecnologia nos proporciona uma vasta gama de artifícios para aprimorar os diversos patamares da indústria. Na área marítima e de navegação, a tecnologia avança significativamente e permite o desenvolvimento de recursos para reduzir consumo de combustível, diminuir impactos ambientais, simplificar projetos de construção, melhorar aproveitamento dos espaços a bordo, garantir a segurança e condições mais favoráveis no ambiente de trabalho da tripulação (vibração e ruído).

Dessa forma, pode-se afirmar que a escolha do sistema de propulsão no projeto de construção será um dos objetos de estudo mais importantes, pois é o elemento responsável por gerar deslocamento e influenciar na viabilidade econômica, já que este estará diretamente envolvido com os custos de operação.

Com este trabalho pretende-se apresentar e destacar as características e especificidades dos sistemas de propulsões mais comuns no campo de atuação da marinha mercante nacional comparando-os quanto ao seu perfil operacional e por final analisar como estes sistemas podem influenciar para que a embarcação seja mais rentável e competitiva perante ao mercado de afretamento, de offshore e outros.

2. ATUAÇÃO DA MARINHA MERCANTE NACIONAL

O Brasil é um país de grande potencial para os modais aquaviários. Conta com um extenso território litorâneo, com um grande volume de rios navegáveis e bacias sedimentares capazes de produzir petróleo e gás para suprir todo mercado nacional. Conseqüentemente, nossa Marinha Mercante abrange todas as diretrizes na área da navegação e contribui imensamente para o desenvolvimento econômico do país.

A seguir será apresentada uma breve descrição das áreas de atuação da marinha mercante nacional para que se possa compreender os diferentes tipos de operações que as embarcações desempenham.

2.1 Navegação de cabotagem e navegação de longo curso

As navegações de cabotagem e longo curso pertencem ao mercado de afretamento e são responsáveis por transportar e escoar bens e produtos da agricultura, do setor de minério, químicos, combustíveis, cargas industriais e tecnológicas além consumíveis de modo geral.

Navegação de cabotagem é aquela realizada entre os portos do território brasileiro utilizando a via marítima ou fluvial e destina-se a escoar produtos do mercado interno. Navegação de longo curso é aquela realizada entre portos nacionais e estrangeiros, destina-se ao escoamento de cargas internacionais do mercado estrangeiro.

Figura 1: Embarcações da navegação de cabotagem e longo curso



Fonte: imagens da internet

Na navegação de cabotagem e de longo curso, as embarcações mais comumente utilizadas são do tipo navios tanque (petroleiro, navio gaseiro, navio químico), navio graneleiro, navio porta-contêiner, navio porta-veículos, navio de carga geral e etc.

2.2 Navegação de apoio marítimo

A navegação de apoio marítimo ou *Offshore* é aquela realizada para apoio logístico a embarcações e instalações em águas territoriais nacionais que atuem nas atividades de pesquisa ou na exploração hidrocarbonetos (combustíveis fósseis).

Figura 2: Embarcações do Apoio marítimo



Fonte: imagens da internet

Essa navegação é realizada por embarcações do tipo Navio de apoio a plataforma - *Platform supply vessel* (PSV), Navio de suprimento, reboque e manuseio de âncora - *Anchor handling supply vessel* (AHTS), Navio de recuperação de derramamento de óleo - *Oil recovery supply vessel* (ORSV), Navio de lançamento de linhas submarinas - *Pipe laying supply vessel* (PLSV), Navio com operação de robô submarino – *Remotely operated vehicle supply vessel* (RSV), entre outros.

2.3 Navegação de apoio portuário

A navegação de apoio portuário é aquela realizada exclusivamente nos portos e terminais aquaviários para atendimento às instalações e atividades portuárias.

Caracteriza-se principalmente no auxílio ao percurso de canais, na atracação, na desatracação, suprimento e logística das embarcações atendidas.

Figura 3: Embarcações do apoio portuário



Fonte: imagens da internet

Essa navegação é basicamente realizada por rebocadores portuários, balsas de apoio, lanchas de práticos e de transporte de tripulantes.

3. SISTEMAS DE PROPULSÃO

A propulsão é a força responsável por gerar deslocamento em um corpo de modo que este se impulse para uma determinada direção. Os sistemas de propulsão marítima são desenvolvidos com a finalidade de criar empuxo e proporcionar o movimento de uma embarcação na água. Dentre suas diversas características, os sistemas de propulsão basicamente podem ser analisados das seguintes formas:

- a) Fonte de energia: As forças responsáveis pelo movimento de uma embarcação têm naturezas diversas. Podem ser adquiridas pela ação do vento, pela energia solar, pela energia nuclear, energia elétrica, pelo poder caloríficos dos combustíveis minerais e combustíveis fósseis, entre outros.
- b) Dispositivo mecânico: É responsável por converter diferentes tipos de energia em ação mecânica que atuará no desenvolvimento físico da propulsão. Podem ser motores elétricos (movidos por grupo de geradores, movidos a baterias, movidos a fotocélulas, células de combustível, etc.), motores de combustão interna, turbinas a gás, turbinas à vapor, entre outros.
- c) Propulsor: Componente do sistema de propulsão que transforma a potência rotacional em impulso linear. O movimento rotacional das lâminas do propulsor é convertido em empuxo, criando uma diferença de pressão entre as duas superfícies onde uma dada massa de água é acelerada em uma direção e a embarcação se move no sentido oposto. Os propulsores marítimos podem ser do tipo hélice convencional (passo fixo ou variável), do tipo túnel (*bow thruster*, *stern thruster*), do tipo azimuthal, do tipo cicloidal (*Voith Schneider*), jato bombas, entre outros.

Embora existam sistemas de propulsão variados com inúmeras configurações, neste capítulo serão apresentados os mais utilizados nos campos de atuação da Marinha Mercante Nacional, que se mostra forte no cenário tecnológico da indústria naval.

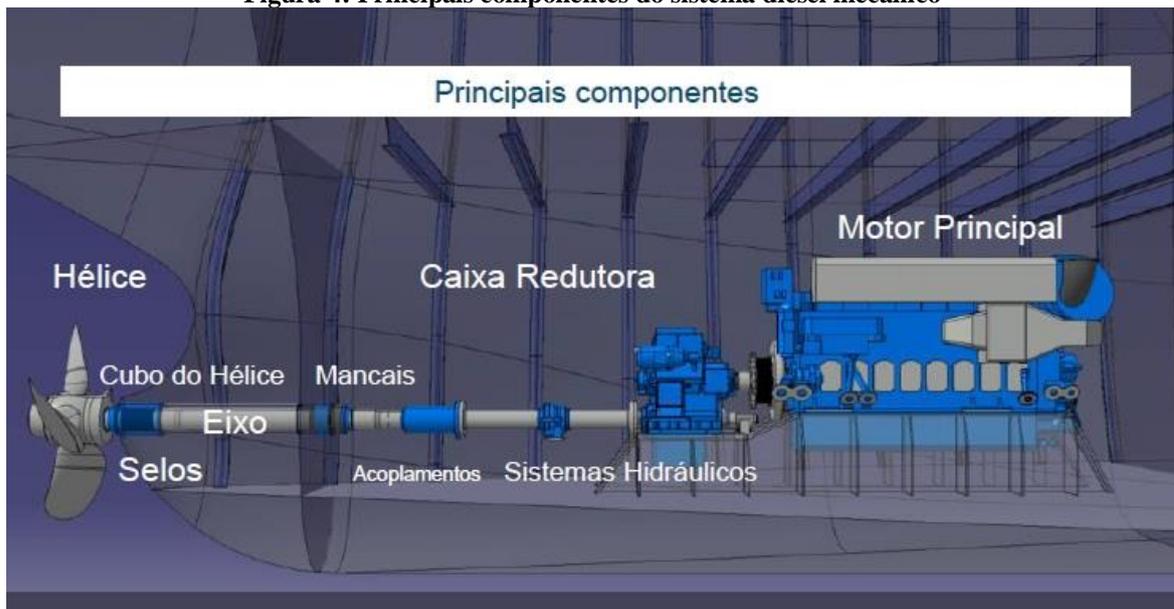
Os sistemas mais presentes em nossas embarcações são o Diesel Mecânico, o Diesel Elétrico e o Híbrido. Estes contam com os melhores recursos para geração de forças de propulsão, manobrabilidade, estabilidade para suas respectivas operações.

3.1 Sistema de Propulsão Diesel Mecânico

O sistema de propulsão Diesel Mecânica é o mais comum em embarcações que necessitam de força bruta, ou seja, uma grande potência propulsiva para gerar avanço de grandes cargas, como no caso dos navios de afretamento. Esse sistema é muito utilizado também em embarcações que necessitam de tração estática (*Bollard Pull*) necessária para atividades como reboque de unidades flutuantes e manuseio de âncoras em solo marinho, atividades típicas dos AHTS's.

A configuração desse sistema propulsivo, como pode ser visualizada na figura 4 a seguir, é caracterizada pela presença de motores de combustão principal (MCP), caixas redutoras, linhas de eixo, hélice, além de outros componentes como tubo telescópico, selos, acoplamentos, mancais de escora e mancais intermediários.

Figura 4: Principais componentes do sistema diesel mecânico



Fonte: Wärtsilä

Os MCPs terão grande influência na configuração geral do sistema mecânico já que podem ter de variadas faixas de velocidade operacionais. Os motores de 2 tempos trabalham com rotações por minuto (RPM) mais baixas enquanto os motores de 4 tempos podem ter velocidades de trabalho bem elevadas.

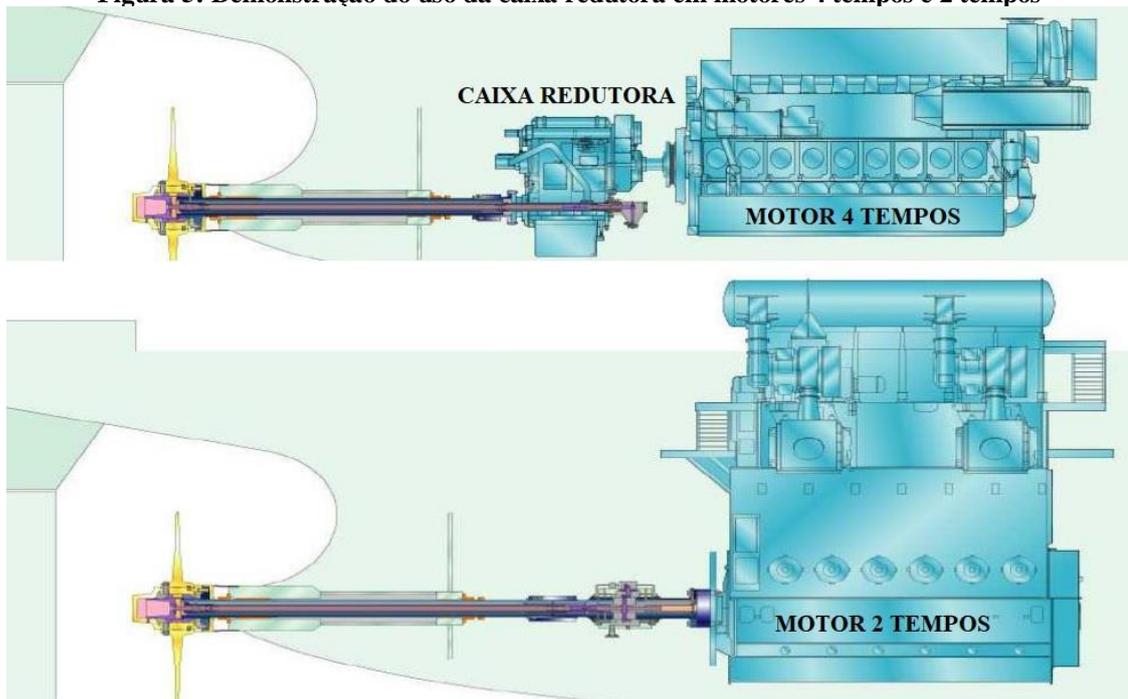
Para que seja possível extrair o máximo de eficiência do sistema de propulsão, alguns fatores de projeto devem ser levados em consideração. Entre esses fatores pode-se destacar o diâmetro do hélice, o número de pás do hélice, o ângulo de ataque das pás e a RPM de trabalho do eixo propulsor.

Quando o propulsor opera em altas velocidades, é criada uma pressão negativa na face posterior do hélice. Esta pressão negativa pode fazer com que a água entre em ebulição, produzindo bolhas que são capazes de reduzir a impulsão da embarcação e ainda resultar na corrosão das pás. Este fenômeno denominado de cavitação.

O emprego das caixas redutoras (*reduction gears*), como popularmente são chamadas, é elemento chave do sistema de propulsão, garantindo que o Motor principal e a hélice tenham RPMs otimizadas, melhorando o avanço e impedindo a ocorrência de cavitação.

As caixas redutoras são muito utilizadas em configurações que operem com motores de 4 tempos onde o MCP e a linha de eixo têm velocidades distintas. Em embarcações com motores de 2 tempos que têm velocidades de operação mais baixas, a RPM de trabalho normalmente não é um fator crítico para perda de eficiência, logo as caixas redutoras podem ser utilizadas para flexibilizar a configuração com outros componentes.

Figura 5: Demonstração do uso da caixa redutora em motores 4 tempos e 2 tempos



Fonte: Wärtsilä

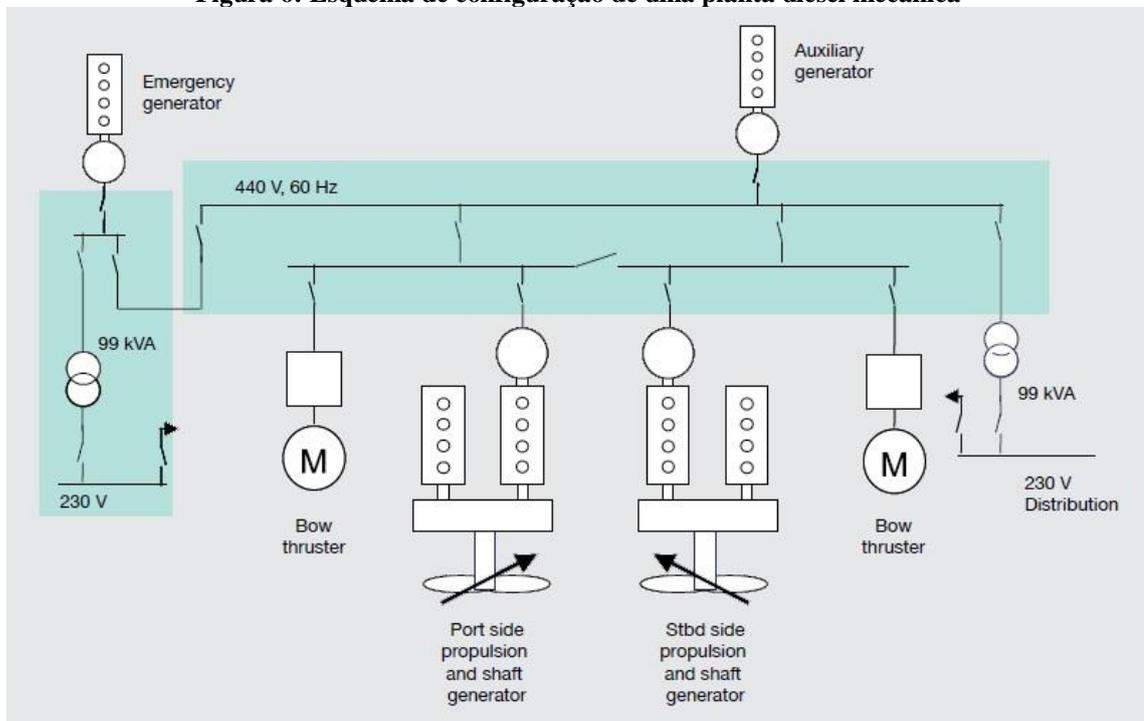
A seguir, algumas das diversas funções e configurações de comunicação que as caixas redutoras permitem no sistema Diesel Mecânico:

- a) Parametrizar velocidades entre o MCP e linha de eixo.
- b) Permitir a função de *Idle run*, onde é possível funcionar o MCP sem carga. Desacoplado do eixo propulsor.

- c) Comunicação de 2 MCPs à uma mesma linha de eixo, podendo estes terem potências iguais ou diferentes.
- d) Comunicação a uma planta de geração de energia através de um gerador de eixo (*Shaft Generator*).
- e) Comunicação com bombas para determinadas plantas hidráulicas e sistemas de combate a incêndio.

A Figura 6 a seguir, exemplifica um esquema diesel mecânico, com 2 MCPs por linha de eixo em uma embarcação com eixos paralelos. Esse esquema de configuração mais simples é bastante comum em embarcações de apoio marítimo.

Figura 6: Esquema de configuração de uma planta diesel mecânica



Fonte: ABB

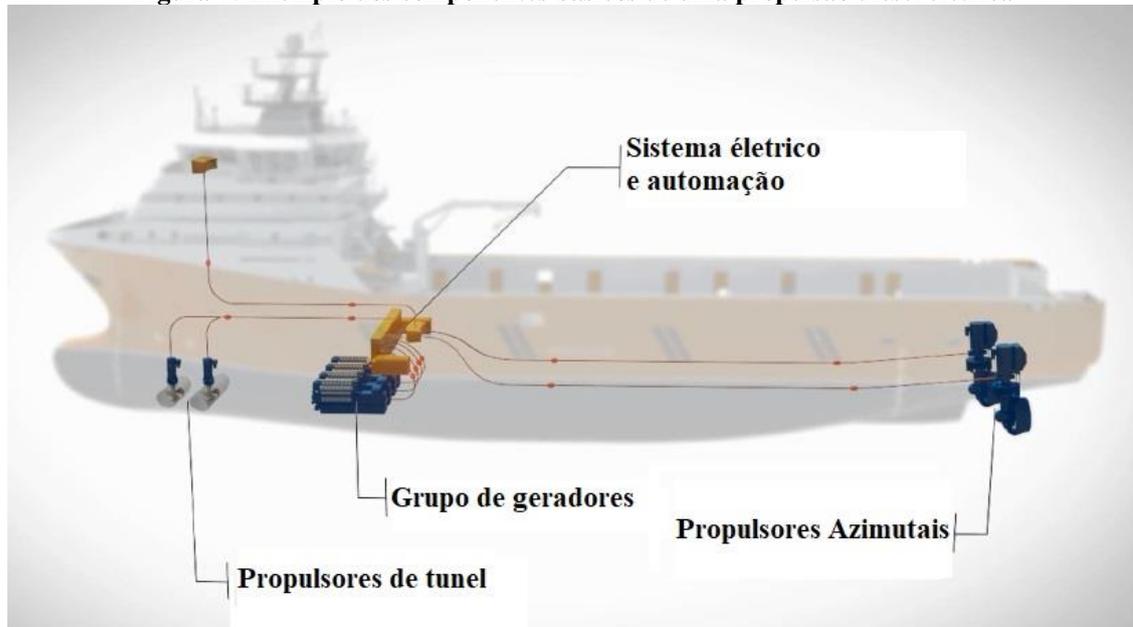
3.2 Sistema de Propulsão Diesel Elétrico

O sistema de propulsão Diesel Elétrico é muito utilizado por embarcações em que a demanda operacional exige uma intensa manobrabilidade, agilidade e precisão na resposta ao posicionamento dinâmico (DP - *Dynamic Positioning*).

Embarcações de serviço Offshore - *Offshore service vessels* (OSV), que não necessitam de alta potência em operação de apoio marítimo e rebocadores portuários, geralmente optam por esta configuração de propulsão ao invés do convencional diesel mecânico. Isso, devido a alguns benefícios de custo operacional que esse sistema proporciona.

A configuração desse sistema propulsivo é caracterizada por motores elétricos de atuação dos propulsores, um grupo de geradores diesel, painéis de distribuição, inversores frequência (baixa ou média voltagem), cabos de transmissão, propulsores do tipo azimutais, propulsores de túnel entre outros, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Exemplo dos componentes básicos de uma propulsão diesel elétrica



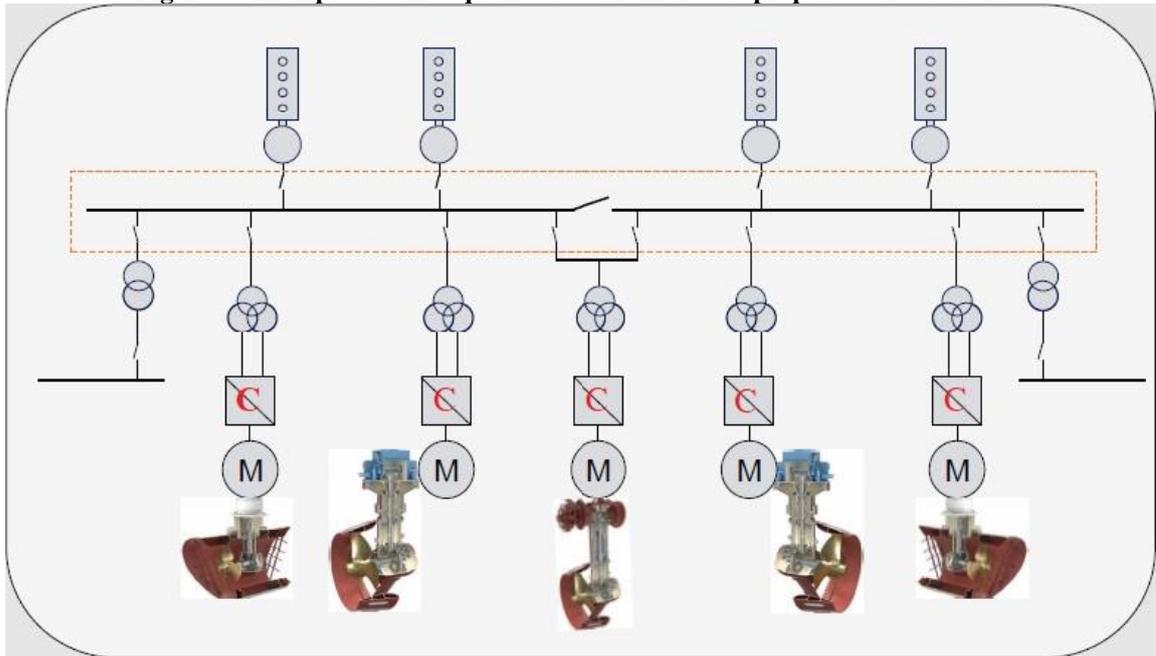
Fonte: Wärtsilä

Ao trabalhar com uma planta de geração em variados arranjos (3, 4, 5 ou mais motores), o sistema diesel elétrico se destaca por abranger benefícios operacionais importantes para embarcação. Optar por diferentes configurações para alimentação dos propulsores e manter uma eficiência energética de acordo com a demanda são pontos cruciais para a operação, para o armador e o cliente. A seguir, alguns benefícios desse sistema:

- a) Manutenções mais dinâmicas dos para os Motores Diesel.
- b) Menor Consumo de Combustível.
- c) Redução de emissão de gases poluentes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x).
- d) Maior confiabilidade.
- e) Maior disponibilidade.
- f) Menor nível de vibração e ruído.

A seguir, a Figura 8 mostra o esquema elétrico de uma embarcação com uma planta de 4 geradores que alimentam um barramento principal. O sistema de propulsão é constituído por 5 propulsores, onde todos são acionados por motores elétricos (representados pela letra “M”). A presença de inversores de frequência (representados pela letra “C”) permitem o controle da velocidade de rotação dos propulsores.

Figura 8: Exemplo de um esquema de barramento de propulsão diesel elétrica



Fonte: Wärtsilä

Outro ponto importante desse sistema é a eliminação das linhas de eixo da embarcação, que possibilita maior flexibilidade nas instalações da praça de máquinas, ou seja, mais espaço para organização das demais plantas de bordo, além de contribuir para uma manutenção mais simplificada e centralizada.

3.3 Sistema de Propulsão Híbrido

Atualmente, nota-se uma ampla tendência pelo uso da propulsão elétrica na construção naval devido aos seus inúmeros benefícios diante aos custos de operação e eficiência energética. Porém, para atender os requerimentos operacionais onde o foco primordial está vinculado a força, tração, e altas cargas, algumas embarcações ainda utilizam o sistema convencional diesel mecânico.

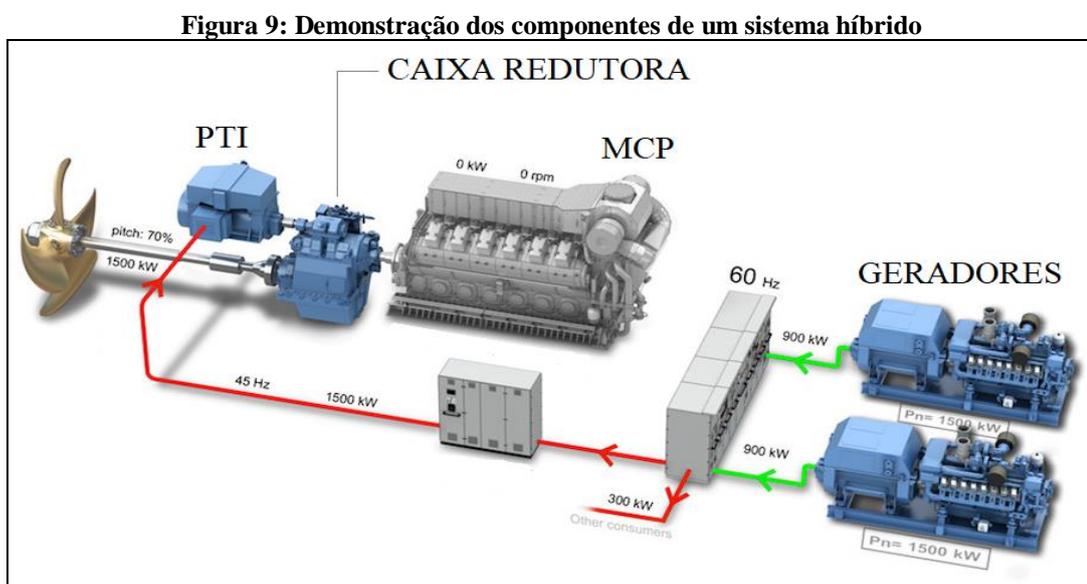
As embarcações de manuseio de âncoras necessitam estar preparadas para desempenhar manobrabilidade em condições extremas, tanto meteorológicas quanto de tração estática. Deve-se entender que, em determinadas condições, o consumo de combustível da

embarcação não é a única preocupação relevante durante a realização de um trabalho. Dessa forma, sob grandes esforços, os AHTSs devem ser projetados para assegurar de maneira efetiva as operações com as instalações offshore e demais partes envolvidas. Essa demanda de potência requer prioridades diferentes de outros tipos de embarcação que visam deslocamentos mais eficiente e posicionamento dinâmico ágil.

É notável que sempre será mais interessante que as embarcações sejam construídas com um perfil operacional diversificado e versátil. Portanto, quando um barco provido de um projeto com motores muito potentes opera em baixas cargas, é gerado um desperdício de energia. Isso foi determinante para se elaborar estudos a respeito de sistema que solucionariam este problema, conhecido como Sistema Híbrido.

O Sistema Híbrido é caracterizado pela “fusão” dos dois sistemas de propulsão anteriormente mencionados. Foi a maneira que engenheiros e projetistas encontraram para aliar as melhores qualidades do diesel mecânico com o diesel elétrico, afim de evitar o consumo excessivo de combustível em embarcações com perfis operacionais que exigem diferentes níveis de energia. Um fator importante para a implementação desse sistema foi que os custos adicionais de construção eram baixos quando comparados com os benefícios gerados.

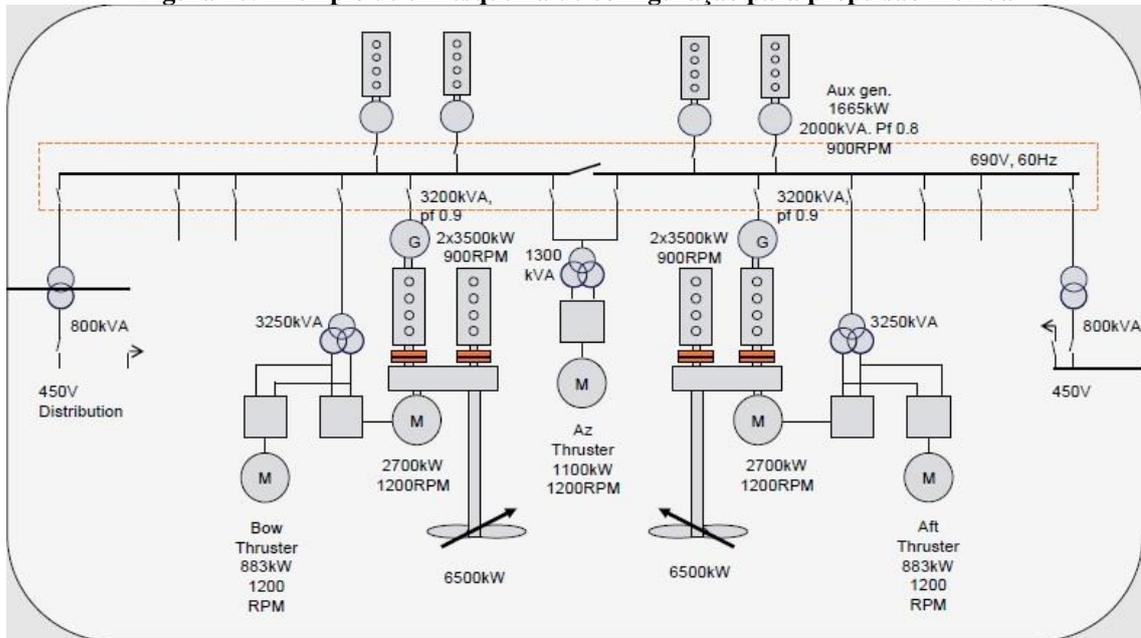
A configuração desse sistema é composta por motores diesel (MCP), caixas redutoras, geradores de eixo, motores elétricos de propulsão *Power take in* (PTI), linhas de eixo, hélice, geradores auxiliares, entre outros.



Fonte: Berger Maritiem

A Figura 10 seguir, apresentam um esquema da configuração híbrida em uma embarcação de AHTS. Pode-se notar a presença de 4 MCPs, 4 geradores auxiliares, 2 motores elétrico de propulsão (PTI), 2 linhas de eixo e 2 propulsores de túnel (*bow thruster* e *stern thruster*).

Figura 10: Exemplo de um esquema de configuração para propulsão híbrida

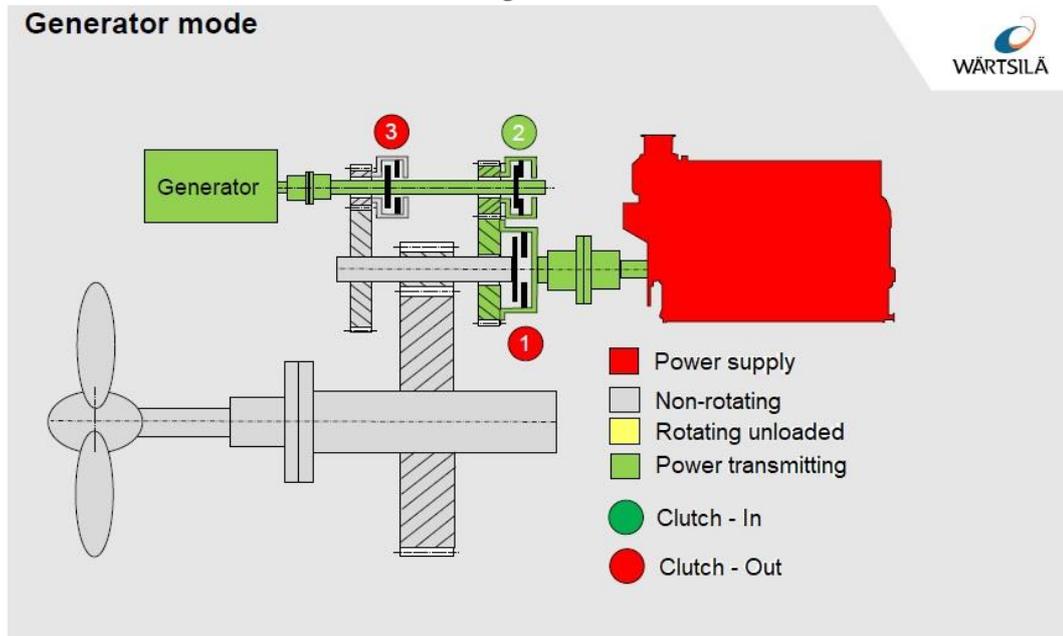


Fonte: Wärtsilä

O sistema de propulsão híbrido permite uma versatilidade na geração de energia, atendendo todas as faixas de consumo que os diversos tipos de operações requerem dos Motores e Geradores presentes a bordo. Trabalhar a maior parte do tempo dentro dos limites ótimos de operação de projeto dos motores e geradores resulta em maior eficiência energética e economia de combustível. Esse sistema pode adequar-se eficientemente de acordo com as necessidades de cada tipo de trabalho.

O Modo Gerador – *generator mode*, onde o MCP funciona desacoplado do eixo propulsor e acoplado ao gerador de eixo, é utilizado para simples geração de energia de modo a alimentar equipamentos de bordo em situação de fundeio, atracado ao porto, ou modo *stand-by*, quando a embarcação está aguardando a operação. A representação da disposição dos componentes desse modo está destacada a seguir na Figura 11.

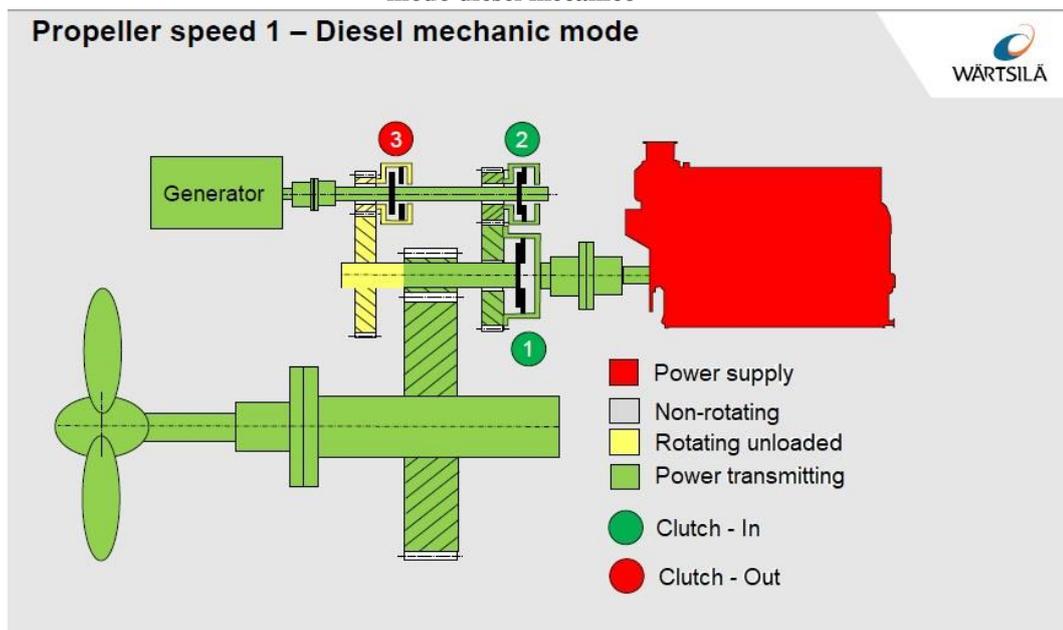
Figura 11: Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo gerador



Fonte: Wärtsilä

O modo Diesel mecânico – *Diesel mechanic mode*, onde o MCP funciona acoplado à linha de eixo e ao gerador de eixo, é utilizado para fornecer energia e propulsão convencional ao sistema. Esse modo é comum na situação de trânsito em alta velocidade, nas operações de manuseio de âncora e reboques de plataformas de petróleo. A representação da disposição dos componentes desse modo está destacada a seguir na Figura 12.

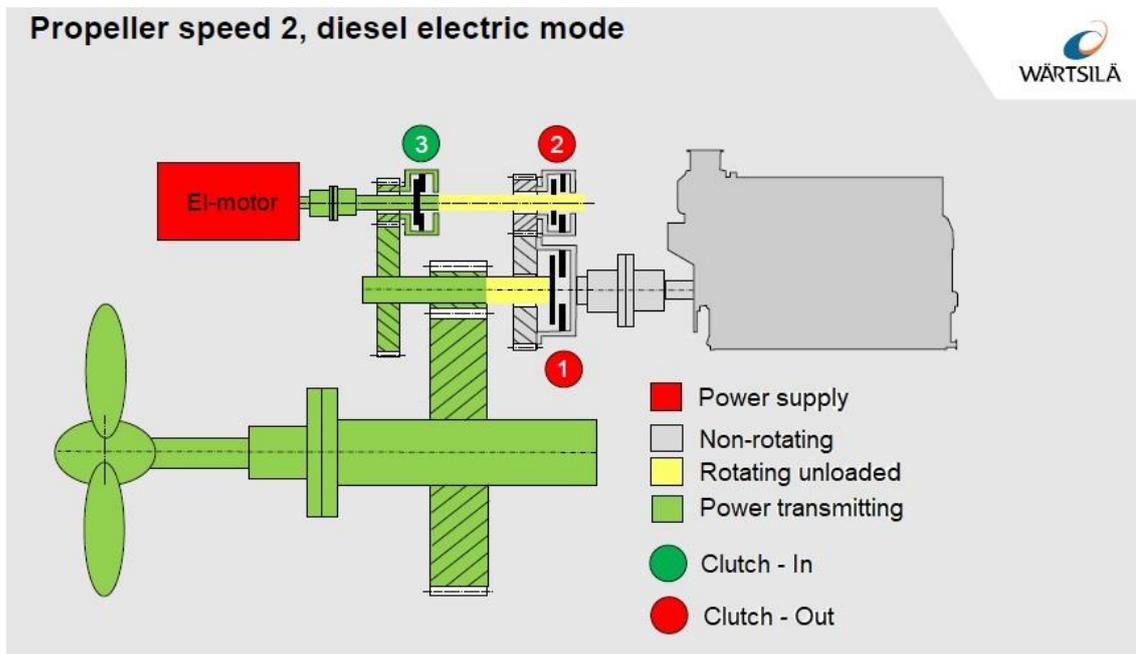
Figura 12: Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo diesel mecânico



Fonte: Wärtsilä

O modo diesel elétrico – *Diesel electric mode*, onde o MCP fica desacoplado de todo o sistema, funciona através da energia fornecida pelos geradores auxiliares a um motor elétrico para propulsão (PTI), que acoplado à linha de eixo, gera movimento rotativo ao propulsor. Esse modo é comum na situação de trânsito em baixas velocidade, nas manobras que demandam pouca intensidade de carga e em algumas situações de DP. A representação da disposição dos componentes desse modo está destacada a seguir na Figura 13.

Figura 13: Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo diesel elétrico



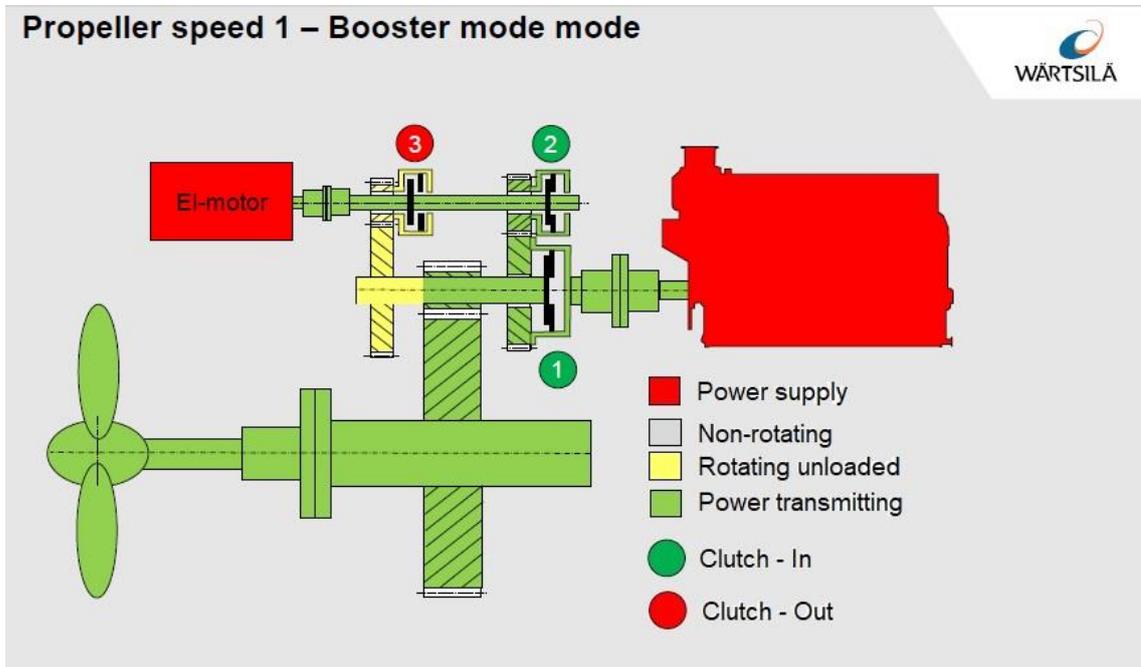
Fonte: Wärtsilä

O modo Híbrido é conhecido como *Booster mode*. Essa configuração terá a propulsão mecânica e elétrica funcionando simultaneamente, assim tanto o MCP quanto o motor elétrico (PTI) estarão acoplados, gerando movimento rotacional à linha de eixo.

A alimentação para os componentes elétricos deste modo, pode ser proveniente dos geradores de eixo, dos geradores auxiliares ou de ambos, dependendo apenas do projeto elétrico característico de cada embarcação e de sua configuração de acoplamentos na caixa redutora.

O PTI acoplado à linha de eixo funcionará como um reforço intensificado para a o sistema de propulsão mecânica com a finalidade de atingir parâmetros de tração estática para operações com alta demanda de esforço para a embarcação, sem que haja sobrecarga dos MCPs. A representação da disposição dos componentes desse modo está destacada a seguir na Figura 14.

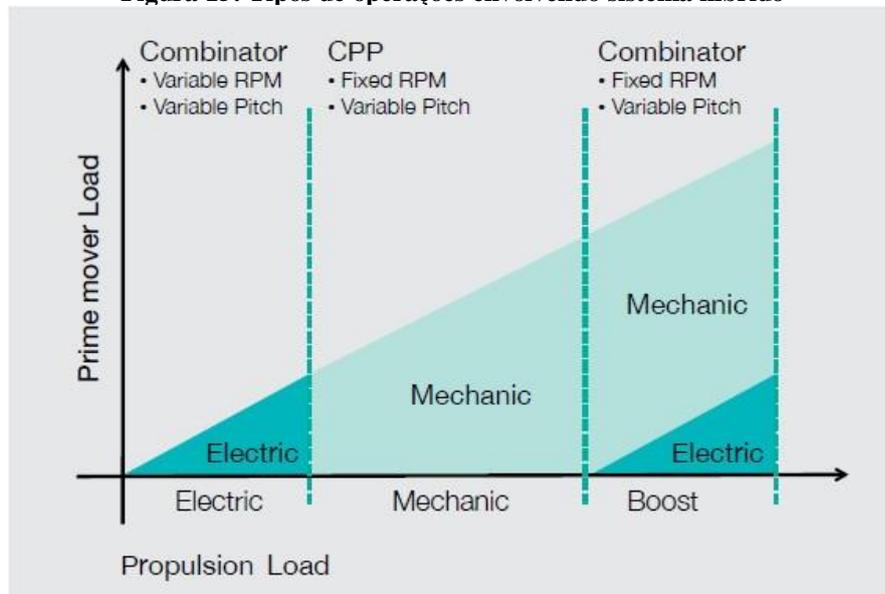
Figura 14: Demonstração dos acoplamentos e componentes do sistema híbrido utilizando o modo *booster*



Fonte: Wärtsilä

A seguir na figura 15, a demonstração da flexibilização de carga e potência que os modos do sistema híbrido permitem.

Figura 15: Tipos de operações envolvendo sistema híbrido



Fonte: ABB

O Modo *boost*, mesmo sendo utilizado diante de condições operacionais mais extremas, destaca o quão versátil esse sistema de propulsão se tornou para solucionar problemas previamente encontrados em embarcações com perfil de alta potência.

4. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS DE SISTEMAS DE PROPULSÃO

Neste capítulo serão expostas algumas evidências comparativas entre as principais características dos sistemas de propulsão responsáveis por garantir a eficiência energética e operacional das embarcações.

Quando se fala em eficiência do sistema de propulsão é muito comum pensar primeiramente em consumo de combustível, pois este envolve os custos operacionais da embarcação. Os valores de afretamento, valores das diárias ou valores de contratos fechados de embarcações diversas, serão sempre impactados pelos gastos gerados com o abastecimento, consumo de combustível e demais custos diretos e indiretos necessários para manter a embarcação operante.

O fator eficiência correlaciona o custo do kilowatt (KW) total gerado pela embarcação e potência disponível para os propulsores. Dessa maneira é possível saber as perdas em torno do sistema e a faixa de rendimento de operação da embarcação.

A propulsão elétrica vem se popularizando bastante nos últimos anos devido à redução de consumo de combustível em comparação com a propulsão mecânica, principalmente na navegação de apoio marítimo. A economia de combustível pode variar de 15% a 25% em perfis normais de operação, e até 40% a 50% em operações com posicionamento dinâmico. Esses valores são calculados de maneira estimada, já que condições estruturais do casco e aspectos de ambientais também influenciam o consumo.

Algumas características dos motores como, flexibilidade de queima, tipos de combustível e o próprio desempenho do combustível utilizado, não serão considerados nas análises pois mesmo atrelados aos sistemas de propulsão, podem ser atribuídas igualmente à qualquer configuração.

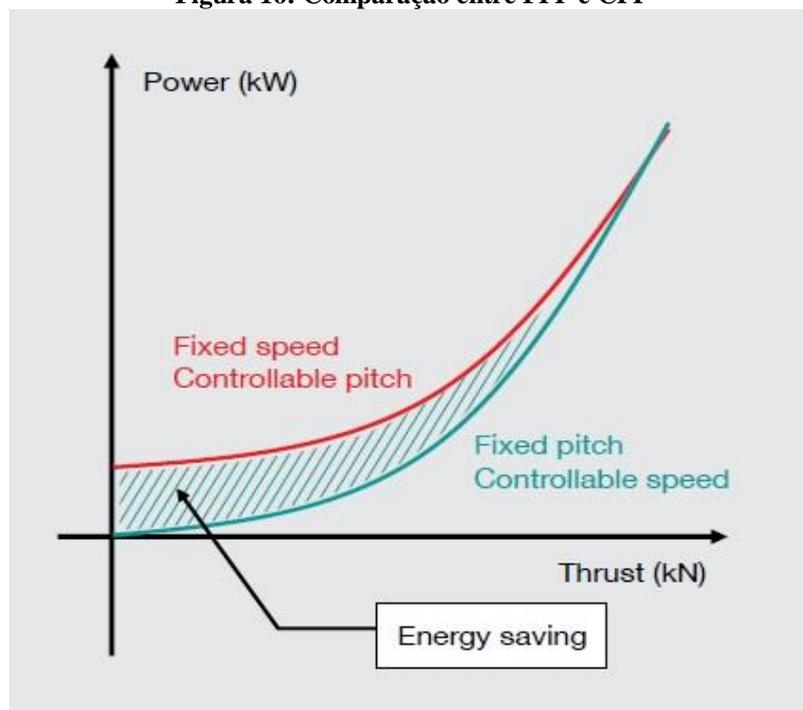
4.1 Velocidade de operação dos propulsores

A redução no consumo de combustível em sistemas diesel elétrico pode ser atribuída a algumas características próprias. A variação de velocidade dos propulsores através dos inversores de frequência permite operações com uma faixa de RPM bem reduzida. As cargas

impostas ao hélice nessa condição são baixíssimas quando comparadas às cargas geradas pela velocidade fixa de propulsão.

A seguir, a figura 16 demonstra a economia de energia (faixa hachurada) entre a propulsão com velocidade fixa utilizando propulsor de passo controlado (CPP), representada pela linha vermelha, e a propulsão com velocidade variável utilizando propulsor de passo fixo (FPP), representada pela linha azul.

Figura 16: Comparação entre FPP e CPP



Fonte: ABB Generations

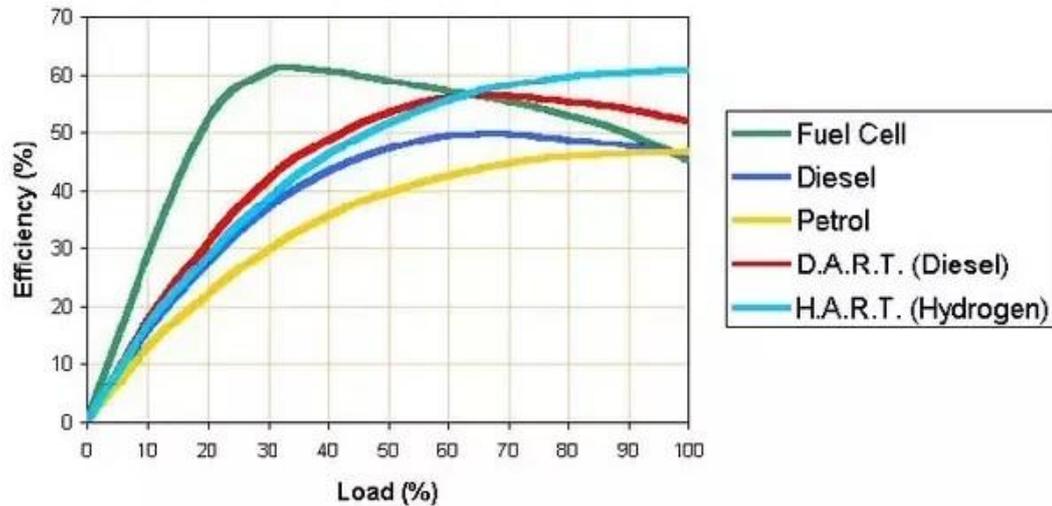
É possível verificar que, mesmo em baixas necessidades de carga (*Thrust* próximo a zero), a configuração com velocidade fixa e CPP, típica do sistema mecânico, requer uma determinada potência, causando perdas energéticas. Porém, à medida que a demanda de potência aumenta essa diferença energética se neutraliza, as linhas se cruzam e é notável a tendência da propulsão com velocidade fixa se tornar até mais eficiente.

4.2 Carga de operação dos Motores

Para que se tenha uma boa queima na câmara de combustão do cilindro, é necessária uma relação estequiométrica ideal entre a massa de combustível e a massa de ar. É sabido que motores de combustão interna em geral não trabalham de maneira eficiente com baixas cargas, pois alguns fatores como volume de ar, temperatura do cilindro, tempo de combustão entre outros, podem estar fora da faixa ótima de operação para que se tenha eficiência da

queima. À medida que se exige mais potência de um motor, os parâmetros da combustão se aproximam de uma faixa otimizada e sua eficiência tende a aumentar. A figura 17 mostra as curvas relacionadas à carga e eficiência para motores utilizando diferenciados combustíveis.

Figura 17: Relação entre carga e eficiência



Fonte: Quora

Pela representação do gráfico nota-se que a eficiência máxima das máquinas é alcançada com cargas mais elevadas. Os motores a diesel por exemplo conseguem retirar energia do combustível eficientemente, operando na faixa de 60 a 70 por cento. Demais combustíveis podem desprender energia de maneiras diferentes, porém em cargas baixas sempre ocorrerão perdas mais significativas.

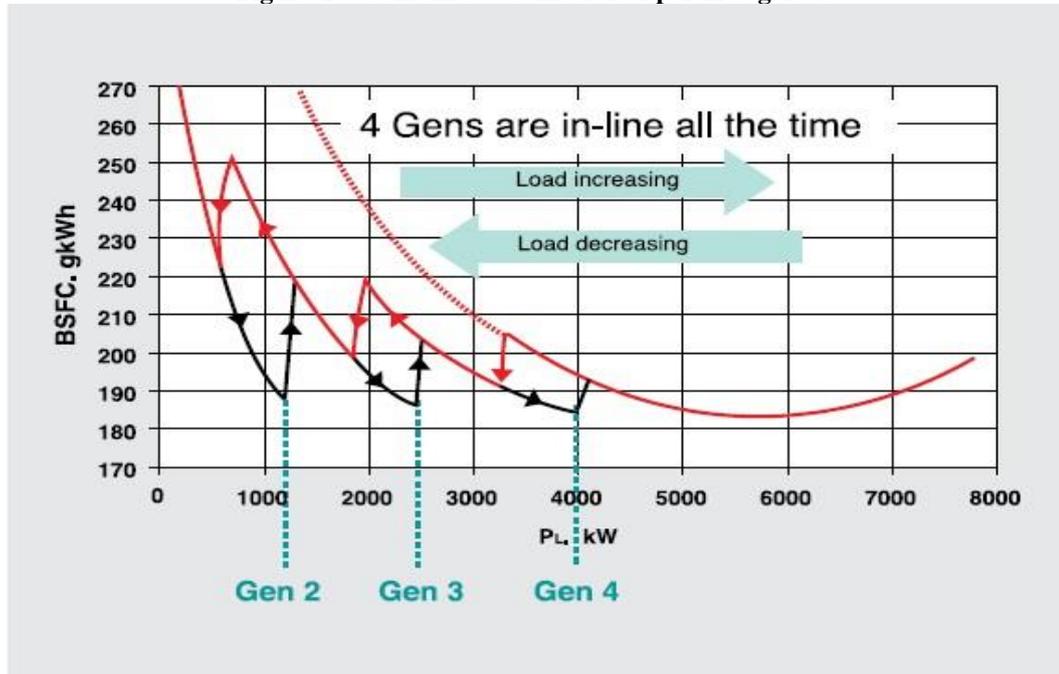
4.3 Partida automática dos motores

A otimização do consumo de combustível no sistema elétrico é consolidada de acordo com o perfil operacional. Essa grande economia é visível apenas para embarcações que operam a maior parte do tempo em DP, em espera ou manobras simples. Nessas dadas condições, existem maiores perdas energética na transmissão entre os motores diesel e as hélices para o sistema mecânico tradicional.

A partida e parada automática dos motores diesel garantem que a carga de trabalho seja distribuída de maneira otimizada para os motores. Assim é possível evitar geradores em funcionamento obsoleto (cargas muito baixas) ou em sobrecarga (cargas muito altas), com faixas de operação onde há consumo desnecessário de combustível.

A Figura 17 representa a economia de combustível na utilização de um número maior motores de menor porte ao invés de utilização de um número menor de motores de maior porte para geração de energia.

Figura 18: Consumo de combustível por KW gerado



Fonte: ABB Generations

4.4 Custos de instalação

Os custos de instalação são proporcionais à tecnologia embarcada em cada sistema de propulsão. No projeto de construção da embarcação, onde serão levantadas as projeções de gasto operacional de acordo com o perfil de carga e potência, será estudada dimensão e configuração que melhor se adapta ao perfil do casco.

Como visto anteriormente, a propulsão elétrica possibilita uma melhor eficiência energética para operações com menor demanda de carga nos propulsores. Para as embarcações com esse perfil, os custos de aquisição e instalação dos componentes necessários para essa propulsão serão recompensados pela redução do consumo de combustível.

As embarcações que operam maior parte do tempo em trânsito de alta velocidade ou sob grande estresse de cargas, optam pela propulsão convencional mecânica. Além de ser um sistema mais simples e de menor custo de aquisição, os benefícios da propulsão elétrica não são óbvios para essas embarcações.

A propulsão híbrida pode ser avaliada como o “meio termo” entre as propulsões citadas. Apesar de ter um curso bem mais elevado que as demais, permite a flexibilização da embarcação com diversos perfis operacionais abrangendo um mercado maior, o que pode ser muito atrativo para o armador e cliente.

4.5 Impacto ambiental

É de conhecimento público que a área marítima é responsável por uma significativa parcela das emissões globais de gases poluentes. A grande participação da indústria naval em todas as áreas responde por 3,3% das emissões globais de CO₂, 15% das emissões globais de NO_x e 13% das emissões globais de SO_x. Dessa forma, as companhias marítimas são obrigadas a cumprir os regulamentos sobre emissões da Organização Marítima Internacional – *International Maritime Organization* (IMO) e da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios – *International Convention for Prevention of Marine Pollution for Ships* (MARPOL).

A certificação Tier é usada para mensurar o nível de um local destinado ao funcionamento de um centro de processamento de dados (CPD). A Classificação de nível Tier tem objetivo comparar o desempenho da topologia de projeto de uma infraestrutura. A Organização Marítima Internacional utiliza o nível Tier III, referente às emissões de NO_x em novas construções de navios e aqueles que operam em áreas de controle de emissão (ECA) ou áreas de controle de emissão relacionadas com óxidos de nitrogênio (NECA). Os navios com arqueação bruta (AB) acima de 500 construídos a partir de 1º de janeiro de 2016, devem cumprir os limites de padrão de emissão (2g/kWh - dois gramas por kilowatt hora) e, a partir de 2021, os navios abaixo de 500 AB com porte acima de 24 metros, também serão abrangidos.

Entende-se que este padrão da IMO só pode ser atendido pelo uso de sistemas de pós-tratamento dos gases de descarga. Os projetos atualmente disponíveis exigem um mínimo de 30% de espaço adicional ao redor da instalação do motor, dessa maneira, adicionar um sistema de recuperação de calor residual ao sistema de propulsão mecânica, elétrica ou híbrido, permite a possibilidade de produzir energia a partir dos gases de escape ou da água de resfriamento de seus motores instalados a bordo e reduzir consumo de combustível.

Atualmente já é comum encontrar construções que já incluem plantas para purificação de gases de descarga, processos de filtragem por catalização, processos de recirculação de

gases e afins. Mas, apesar de todos esses recursos, nenhum procedimento é mais eficiente para minimizar as emissões quanto o uso de combustíveis alternativos (por exemplo Amônia NH₃) ou a redução da queima de combustíveis fósseis através de sistemas com maior eficiência energética.

4.6 Comparação entre os sistemas de propulsão

A notável redução no consumo de combustível associado a propulsão elétrica, acarreta muito atratividade para o projeto de embarcações do ramo *offshore*, navegação de interior e outros perfis que não requerem constante e rotineiras operações em altas potência. Nessas condições, as vantagens desse sistema são bem óbvias em relação aos custos e eficiência. Por outro lado, existem embarcações com atividades distintas e que exigem dinâmicas bem variadas, com alto grau de empuxo ou tração estática. Para essas embarcações as vantagens da propulsão elétrica são neutras ou até nulas. Assim, devido ao custo de maquinário, será mais comum o uso da propulsão convencional mecânica para essas embarcações.

Uma informação importante de se considerar é que as perdas de potência entre a linha de eixo e caixa de engrenagem de um design convencional é da ordem de 3% a 4% enquanto as perdas de transmissão em um sistema diesel elétrico estão na faixa de 8% a 11%. Existem então variadas vantagens em cada tipo de sistema de propulsão e eles devem ser escolhidos onde há melhor aproveitamento de suas características principais.

Pode se então correlacionar os sistemas de propulsão às suas vantagens e fator operacional da seguinte forma.

- a) Propulsão mecânica: Sistema mais simples, menor custo de aquisição, melhor eficiência energética em alta demanda de carga, mais força de empuxo gerada, mais vibrações, mais ruídos, maior ocupação dos espaços úteis de bordo.
- b) Propulsão elétrica: Sistema mais automatizado, custo maior de aquisição, menor consumo de combustível, melhor manobrabilidade, melhor eficiência energética em baixa demanda de carga, menos emissões, menos ruídos, melhor aproveitamento dos espaços de bordo.
- c) Sistema híbrido: Sistema flexível a modos de operação diversos, versatilidade no uso das máquinas, economia de combustível para embarcações com perfis específicos, custo alto de instalação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho conclui-se que cada navio é diferente e requer uma abordagem personalizada. É de suma importância saber que a propulsão mecânica, elétrica ou híbrida deve se adequar ao seu perfil de navegação. Assim os projetos de cada embarcação, independente de dimensão ou tipo de atividade, passarão por diversas análises onde os aspectos relevantes dos sistemas propulsivos serão considerados.

Para se obter melhores retornos operacionais, o investimento inicial e a receita esperada devem ser meticulosamente estudados. Em outras palavras, os gastos com manutenções, custo final dos componentes, instalação durante o período construção, devem ser cobertos pelo valor arrecado nos contratos ao longo da vida útil da embarcação. Para isso, necessita-se buscar uma otimização completa que agregue o perfil de navegação, o projeto do navio, os sistemas de propulsão, os sistemas de energia e outros sistemas integrados aos interesses e objetivos finais da empresa de navegação.

Além disso, as soluções “verdes” para minimização dos impactos ambientais de acordo com as regulamentações da IMO, estão bastante evidenciadas no contexto da área marítima. Essas exigências implicam em adequações e mudanças que as empresas devem seguir. A partir disso pode ser possível que uma determinada propulsão não seja a solução mais econômica para um tipo de embarcação, mas existem maneiras diversas de cumprir as necessidades das empresas de navegação e ainda respeitar as regras de emissão atendendo às soluções ecológicas para um futuro mais sustentável.

Diante de todos os tópicos apresentados neste trabalho, pode-se concluir que os sistemas de propulsão, sejam eles o mecânico, elétrico ou híbrido, evoluem tecnologicamente e se adaptam às demandas criteriosas do mercado para proporcionar, de acordo com suas características individuais, soluções para eficiência, manobrabilidade, manutenibilidade, segurança e lucratividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB Generations. Hybrid Propulsion System.

ABB Generations. Parallel hybrid propulsion for AHTS.

BARCELLOS, R. **O sistema híbrido de propulsão como uma alternativa viável aos sistemas diesel-elétrico e diesel-mecânico.** 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2012.

BERGER MARITIEM. **Hybrid propulsion.** Disponível em: <http://www.bergermaritiem.nl>
Acesso em setembro de 2020.

SHARDA. **Different types of marine propulsion systems used in the shipping world.**
Disponível em: <http://www.marineinsight.com>. Acesso em setembro de 2020.

WARTSILA. **Marine Products.** Disponível em: <http://www.wartsila.com/en/marine-solutions/products/products>. Acesso em setembro de 2020.