

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

MARCOS RENATO RODRIGUES LOPES

SISTEMAS DE PROPULSÃO MECÂNICA, DIESEL-ELÉTRICA E HÍBRIDA EM
EMBARCAÇÕES

RIO DE JANEIRO
2014

MARCOS RENATO RODRIGUES LOPES

**SISTEMAS DE PROPULSÃO MECÂNICA, DIESEL-ELÉTRICA E HÍBRIDA EM
EMBARCAÇÕES**

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

Orientador: MSc Luiz Otavio Ribeiro Carneiro

RIO DE JANEIRO

2014

MARCOS RENATO RODRIGUES LOPES

**SISTEMAS DE PROPULSÃO MECÂNICA, DIESEL-ELÉTRICA E HÍBRIDA EM
EMBARCAÇÕES**

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

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: MSc Luiz Otavio Ribeiro Carneiro

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedico esta Monografia a minha esposa Raquel, e aos meus filhos Thiago, Fernanda e Rafael, que muito me incentivaram nesta realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a Deus por mais esse crescimento na minha jornada em busca de conhecimento e crescimento profissional. À minha família pela compreensão e paciência nos momentos de ausência. Aos meus colegas e amigos pelo companheirismo e ajuda prestada. Aos professores pela dedicação e orientação em todo o processo de aprendizagem nessa nova etapa em busca do conhecimento.

O coração do homem dispõe o seu caminho, mas é o Senhor quem dirige seus passos. Provérbios 16,9.

RESUMO

As diversas formas de propulsão das embarcações é tema de enorme relevância desde que o homem resolveu desbravar o oceano. Buscar um sistema propulsor que atenda às diversas necessidades das embarcações é de suma importância, pois a otimização da propulsão proporciona melhor deslocamento dos navios, melhora do posicionamento estático e dinâmico, diminuição dos custos, ruídos, vibrações e poluição do ambiente. Este trabalho tem o objetivo de descrever os sistemas de propulsão diesel-mecânico, diesel-elétrico e híbrido, mostrando suas características, funcionamento, aplicabilidades, vantagens e desvantagens. Também ressalta vários tipos de elementos propulsores como os hélices de passo fixo, de passo variável, em tubeira, vertical ou Voith Schneider e os azimutais.

Palavras-chave: Propulsão elétrica. Propulsão diesel-mecânica. Propulsão híbrida. Propulsores Azimutais.

ABSTRACT

The various forms of propulsion of vessels is a subject of enormous relevance since humankind decided to explore the ocean. Finding a propulsion system that meets the diverse necessities of a vessel is of the utmost importance, once propulsion optimization leads to better motion, lower costs, noise, vibration and environmental pollution and also improves static and dynamic positioning,. This paper aims to describe the diesel-mechanical, diesel-electric and hybrid propulsion systems, indicating their characteristics, forms of operation, applicability, advantages and disadvantages. It also highlights various propulsion elements such as fixed pitch propellers, variable pitch propeller, nozzle propeller, vertical propeller or Voith Schneider and azimuth propeller.

Key words: Electric propulsion. Diesel-mechanical propulsion. Hybrid propulsion. Azimuth Propeller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Instalação propulsora com quatro motores, engrenagens redutoras e dois hélices	14
Figura 2 -	Layout da propulsão Diesel-Elétrica	18
Figura 3 -	Motor elétrico de propulsão	19
Figura 4 -	Circuito básico estrela-triângulo	22
Figura 5 -	Bloco esquemático soft start	22
Figura 6 -	Arquitetura de sistema DEM para AHTS	24
Figura 7 -	Arquitetura típica de um sistema de propulsão DEM de um PSV	25
Figura 8 -	Propulsor de passo fixo	26
Figura 9 -	Propulsor de passo variável	27
Figura 10-	Propulsor Voith Schneider	28
Figura 11-	Propulsores Azimutais	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHTA:	<i>Anchor Handling Tug Supply</i>
RPM:	Rotação Por Minuto
MCP:	Motor de Combustão Principal
MCA:	Motor Auxiliar
MCI:	Motor de Combustão Interna
DP:	<i>Dynamic Positioning</i>
CA-CA:	Cicloconversor
CSI:	Inversor Fonte de Corrente
CC:	Corrente Contínua
PWM:	Modulação por Largura de Pulso
POD:	<i>Podded Drive</i>
DEM:	Diesel-Elétrico-Mecânico
PSV:	<i>Platforma Supply Vessels</i>
ENIDH:	Escola Superior Náutica Infante D. Henrique
FPP:	Hélice de Passo Fixo
CPP:	Hélice de Passo Variável ou Controlável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	PROPULSÃO EM EMBARCAÇÃO	12
3	INSTALAÇÕES PROPULSIVAS	14
3.1	Propulsão diesel-mecânica	14
3.1.1	Motores Diesel	16
3.1.2	Motores de combustão principal e motores auxiliares	17
3.2	Propulsão diesel-elétrica	17
3.2.1	Motores elétricos	19
3.2.1.1	<i>Motor de indução trifásico</i>	20
3.2.1.2	<i>Formas de partidas de motores elétricos</i>	21
3.2.2	Conversores usados no setor naval	23
3.3	Propulsão híbrida (diesel-mecânica + diesel-elétrica)	23
3.3.1	Funcionamento do sistema híbrido em um PSV	25
3.4	Elementos propulsores	26
3.4.1	Hélice de passo fixo (FPP)	26
3.4.2	Hélice de passo variável ou controlável (CPP)	26
3.4.3	Hélice em tubeira	28
3.4.4	Hélice vertical (Sistema Voith Schneider)	28
3.4.5	Azimutais	29
3.4.5.1	<i>POD e AZIPOD</i>	30
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

O mar sempre foi uma importante fonte econômica para a humanidade, tanto na pesca, como na área de transporte, comércio e turismo. O desenvolvimento das embarcações possibilitou ao homem atravessar rios, mares e oceanos, vencendo dessa forma, longos percursos.

As canoas são consideradas as primeiras embarcações usadas para transportar pessoas e cargas e sua propulsão era feita pela própria correnteza dos rios ou pelo homem através dos remos.

Mais tarde, com o surgimento dos barcos a vela, que eram impulsionados pela força do vento, foi possível percorrer uma distância maior do que com os barcos a remo. Com o aprimoramento dos barcos à vela, surgiram as caravelas, que eram mais velozes e foram peça fundamental no período das Grandes Navegações.

Com a Primeira Revolução Industrial e a descoberta do ferro como matéria prima e do carvão como fonte de energia surgiram os primeiros navios a vapor. As viagens que antes demoravam meses em barcos a vela e caravelas foram reduzidas a dias.

No período da Segunda Revolução Industrial, houve o emprego do aço como matéria prima, do petróleo como fonte de energia e surgiram os motores de combustão interna. Nas máquinas de combustão interna, a queima do combustível se processa no interior da própria máquina e podemos citar como exemplo, a turbina a gás, o motor a explosão e os motores a Diesel.

Com a descoberta da eletricidade também surgiram os motores elétricos. A eletrônica de potência proporcionou o aprimoramento da propulsão elétrica, que vem sendo estudada e aperfeiçoada, tendo em vista a solução das necessidades que vão surgindo no horizonte marítimo, como por exemplo, o posicionamento dinâmico, a redução do consumo de combustíveis fósseis, a redução da poluição e dos ruídos, dentre outras.

Esta revisão bibliográfica mostra a evolução, as características e especificidades dos sistemas de propulsão Diesel-mecânico, Diesel-elétrico e Híbrido, e busca avaliar qual o melhor sistema propulsivo utilizado para as embarcações e para as operações realizadas nessas embarcações.

2 PROPULSÃO EM EMBARCAÇÕES

A utilização de embarcações para exploração e comércio é de extrema importância, acarretando, desta forma, um grande interesse no aperfeiçoamento de operacionalidade, tecnologia e custo deste meio de transporte e de seus sistemas propulsores (Neves, 2013).

O sistema propulsivo é o conjunto de equipamentos que funcionam em comunhão, responsáveis pela geração de movimento na embarcação e influencia na viabilidade econômica da mesma. Para que se tenha um sistema eficiente, é preciso “abrir mão” da eficiência individual de cada um dos equipamentos e buscar a configuração que proporcione a melhor eficiência do conjunto (Souza, 2013; Montfort, 2014).

Uma instalação propulsora é constituída por um conjunto adequadamente integrado de máquina principal, sistema de transmissão e elemento propulsor. Há diversos tipos de máquina principal, como por exemplo, motores Diesel, turbinas a vapor, turbinas a gás e motores elétricos. Os sistemas de transmissão podem ser por acoplamento direto ou por uso de redutores, e os elementos propulsores podem ser hélices de passo fixo ou de passo controlável, hélices contra rotativos e hélices *podded* azimutais (Valle Filho, 2011).

No passado, o armador ou o projetista tinha como escolha imediata um motor diesel lento acoplado diretamente a um hélice de passo fixo, ou um motor diesel de média velocidade, a quatro tempos, acionando através de engrenagens redutoras um hélice de passo fixo ou controlável. Atualmente, a propulsão dos navios que entram em serviço é obtida com o acoplamento direto, muito esporadicamente com engrenagens redutoras, de motores a dois tempos a hélices de passo fixo ou controlável, motores de média velocidade a quatro tempos e engrenagens redutoras ou ainda por instalações diesel-elétricas com recurso a motores diesel, a quatro tempos, rápidos ou de média velocidade (Trindade, 2012).

A busca pelo sistema de propulsão mais eficiente para a embarcação, muitas vezes, não é tarefa das mais fáceis. A dificuldade se apresenta de forma mais clara quando a embarcação em questão possui dois ou mais modos operacionais distintos, e o sistema de propulsão mais adequado para um destes modos acaba por ser menos eficiente para o outro (Barcellos, 2012).

Desta forma, a escolha do sistema propulsivo a ser utilizado em uma

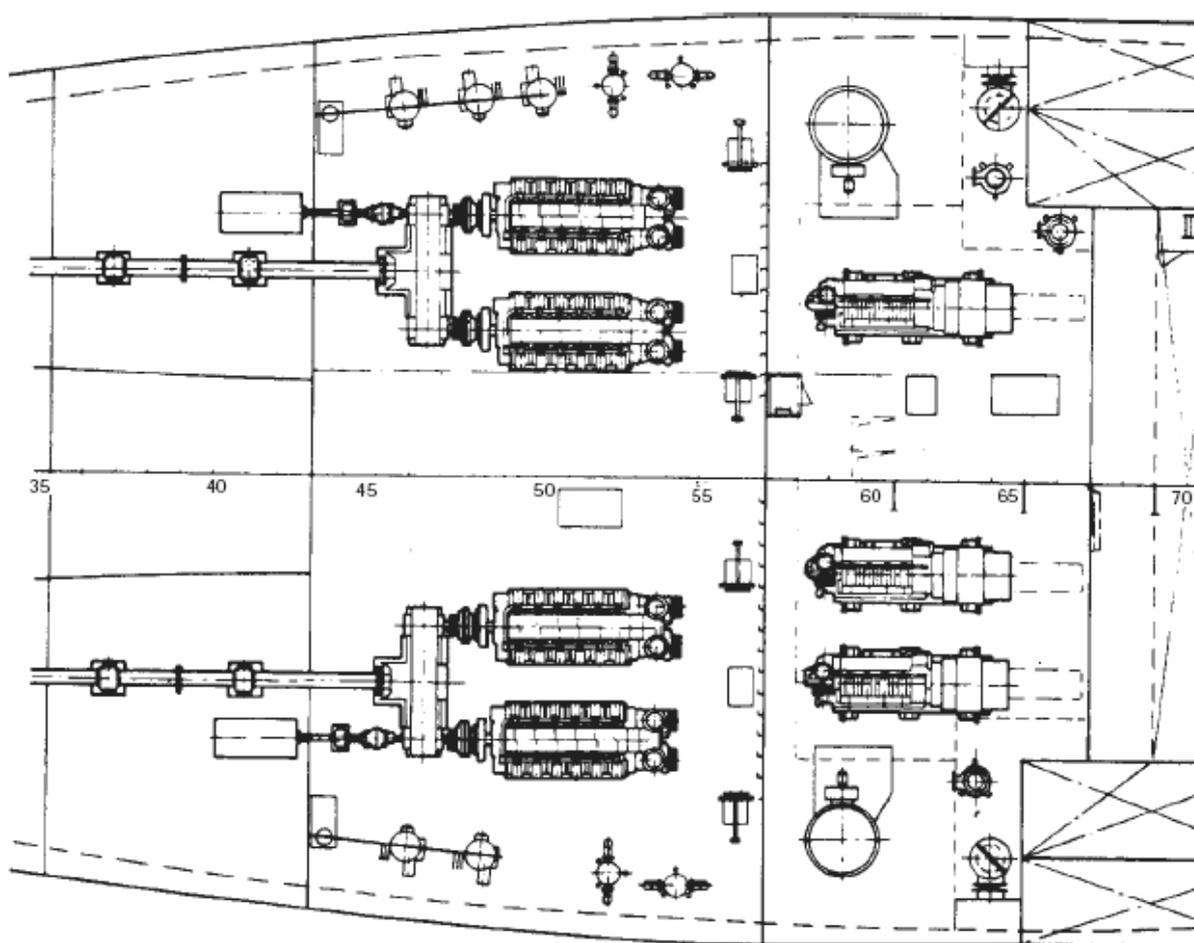
embarcação está intimamente ligada ao perfil operacional e ao contexto geográfico ao qual essa embarcação está inserida (Souza, 2013).

3 INSTALAÇÕES PROPULSIVAS

3.1 Propulsão diesel-mecânica

A energia mecânica necessária à propulsão de embarcações com propulsão diesel-mecânica é fornecida por motores de combustão interna (MCI) (Fonseca, 2005).

Figura 1 – Instalação propulsora com quatro motores, engrenagens redutoras e dois Hélices.



Fonte: ENIDH – Trindade, 2012

As instalações Diesel têm preferência marcante na seleção de sistemas de propulsão de navios mercantes. Isso se deve, principalmente, ao seu baixo custo operacional decorrente da associação de baixo consumo específico de combustível e emprego de óleo pesado, que é o combustível de menor preço por unidade de energia. Essa predominância das instalações propulsoras Diesel teve início na década de 60,

quando os motores de baixa rotação passaram a operar com óleo pesado (Valle Filho, 2011).

É um sistema propulsivo mais comumente utilizado em embarcações que necessitam de “força bruta”, de grande potência propulsiva, que produzam tração estática (*Bollard Pull*) necessária para atividades como reboques de unidades flutuantes e/ou outras embarcações e que necessitam de fixação de âncoras em solo marinho, como por exemplo, os navios AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*).

A configuração de tal sistema propulsivo é caracterizada pela presença de duas linhas de eixo, com caixas redutoras de dupla entrada e saída única, além de dois motores Diesel por linha de eixo, em um arranjo conhecido como pai e filho, no qual os motores possuem potências distintas. Em cada caixa redutora há, geralmente, uma tomada de força com um gerador de eixo (Souza, 2013).

Em navios de grande porte com potências elevadas, geralmente são usados a propulsão direta com motores diesel de dois tempos, lentos e com regime de funcionamento de 70 a 200 rpm.

A propulsão indireta, ou seja, a adoção de uma caixa redutora entre o motor e a linha de veio, é usada para motores diesel de média rotação e para potências elevadas.

Para navios de média dimensão e navios pesqueiros, a propulsão efetua-se por motores diesel de média rotação, que operam entre 200 a 600 rpm, devido às limitações da própria embarcação (Rodrigues, 2011/2012).

A instalação mais comum é a unidade de propulsão direta. Esta instalação é relativamente de baixo custo, simples de instalar, confiável e simples de operar. No entanto, tem algumas desvantagens para operação de baixa velocidade. Na maioria das vezes, o controle de velocidade do acionamento diesel direto é reforçado pela utilização de uma hélice de passo controlável. Nesse caso, o sentido de impulsão é controlado através da inversão do passo da pá da hélice, e não da inversão do sentido de rotação do hélice. Com um sistema de hélice de passo controlável, o impulso e velocidade do hélice da embarcação são controlados por combinação de mudança do sinal de velocidade do regulador do motor e pela variação das pás do hélice (King, 1998).

3.1.1 Motores Diesel

Os principais componentes dos motores Diesel são:

- a) Bloco - é a peça mais pesada e mais volumosa do motor. É nele que ficam os orifícios denominados cilindros, dentro dos quais trabalham os êmbolos. O bloco também possui espaços ociosos em volta dos cilindros denominados jaquetas, destinados à passagem da água de resfriamento do motor;
- b) Cabeçote - é a peça que fecha os cilindros por cima, e na qual são montados os balancins, as válvulas de admissão e de descarga e os injetores de combustível. Possui também espaços vazios destinados à circulação da água de resfriamento;
- c) Cáster - é uma espécie de bacia que serve de depósito para o óleo lubrificante do motor;
- d) Êmbolo ou pistão - é a peça do motor que trabalha no interior do cilindro e que recebe diretamente o impulso dos gases da combustão;
- e) Biela ou conectora - é a peça de ligação entre o êmbolo e o eixo de manivelas. É com o auxílio dela que o movimento alternado do êmbolo é transformado em rotativo no eixo de manivelas do motor;
- f) Eixo de manivelas ou virabrequim - é a peça na qual articula o mancal bipartido da biela, e que é responsável pela transmissão do movimento rotativo do motor ao seu utilizador, que no caso dos navios é o eixo propulsor;
- g) Volante - é um disco bastante pesado instalado na extremidade do eixo de manivelas, destinado a armazenar energia e facilitar a continuação do movimento de rotação do eixo de manivelas;
- h) Turbo-alimentador - (turbo-compressor) é o componente do motor que abastece os cilindros com a maior massa de ar possível, permitindo um bom aumento de potência. Quando o motor não possui turbo-alimentador, a sua potência é menor porque o êmbolo aspira uma menor quantidade de ar. Observe que esse componente é constituído por uma turbina acionada pelos próprios gases de descarga do motor e por um compressor montado no mesmo eixo, o qual aspira o ar da atmosfera, eleva a sua pressão e o envia para os cilindros.
- i) Além dos componentes aqui citados, o motor Diesel possui ainda muitos outros, como a bomba e o filtro de óleo lubrificante, o tanque de combustível, os filtros

de óleo combustível, os filtros de ar, os bicos injetores, que constituem os diversos sistemas de um motor. (Santos Júnior, 2006)

3.1.2 Motores de combustão principal e motores auxiliares

Os motores diesel na nomenclatura marítima são chamados de MCP (Motor de Combustão Principal). Os motores tanto podem ser de ciclos de 2 tempos ou de 4 tempos. Os motores de ciclos de 2 tempos e de baixa ou média rotação (entre 80 e 300 rpm) são mais comuns nos navios de grande porte. Nos navios de pequeno porte, também se utilizam motores de alta rotação (acima de 900 rpm).

Além dos MCPs (motores principais), os navios são equipados com MCAs (motores auxiliares), que são acoplados a grandes geradores, que geram a energia elétrica consumida a bordo. Especialmente nos navios porta-containers, o consumo de energia elétrica é muito elevado, devido à necessidade de alimentar as máquinas de refrigeração dos containers frigoríficos, usados em grande escala no mundo, para transportar proteína animal e frutas (Angioletti).

3.2 Propulsão diesel-elétrica

A propulsão elétrica de embarcações surgiu no início do século XX, acompanhando o desenvolvimento dos submarinos da época, que não podiam acionar os seus grupos geradores movidos por motores de combustão interna (MCI), por causa da inexistência de ar suficiente para a queima do combustível no MCI. O que também motivou o uso desse modelo de propulsão foi a dificuldade de armazenamento da energia elétrica.

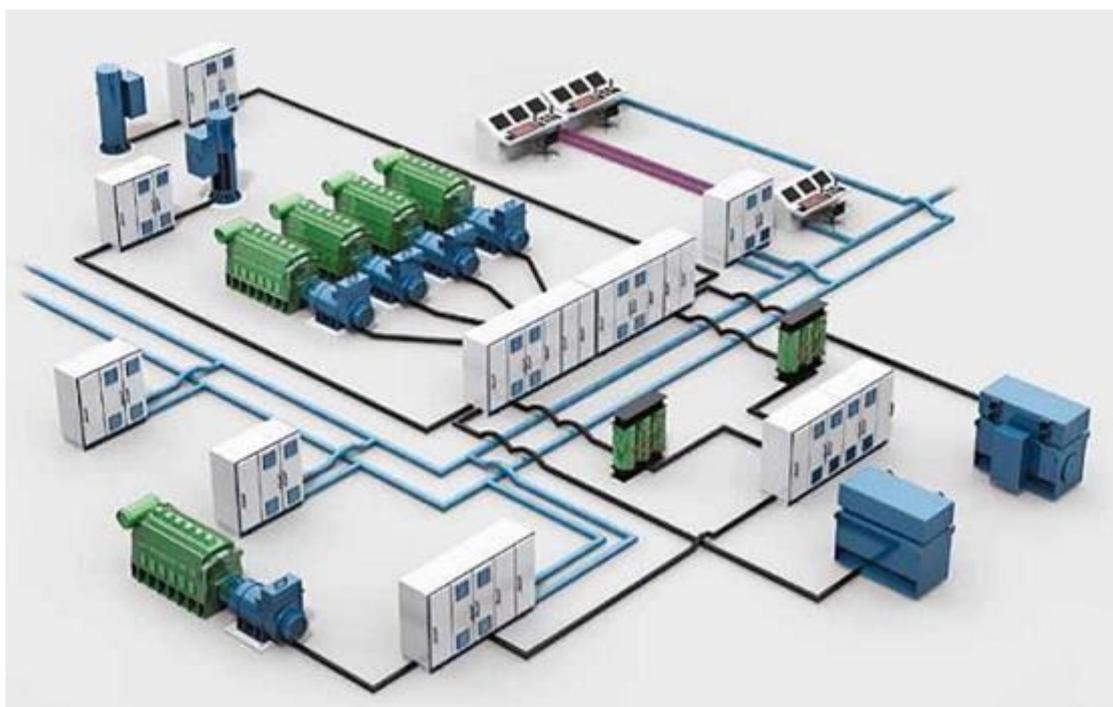
Após a Segunda Guerra Mundial, rebocadores de alto mar foram produzidos com um similar aos de propulsão elétrica, pois tinha a vantagem de permitir variações suaves, pequenas e precisas na rotação do eixo propulsor, característica muito importante em fainas de reboque e salvamento (Martins, 2008)

A utilização da propulsão elétrica vem se difundindo nos diversos setores da indústria marítima, e está se estabelecendo como uma das melhores opções para promover a redução de custos operacionais neste ambiente altamente competitivo. Inicialmente adotada em projetos de quebra-gelos e navios especializados, a propulsão elétrica tem conquistado novos mercados (Freire; Ferreira, 2004).

Normalmente utilizada em embarcações em que aspectos como o alto grau de manobrabilidade e a necessidade de DP (*Dynamic Positioning*) fazem com que a escolha de um sistema não convencional seja melhor (Souza, 2013)

A propulsão diesel-elétrica é baseada em geradores e motores diesel-elétricos, não utilizando MCP (Motor de Combustão Principal). Consiste na utilização de um determinado número de geradores capazes de suprir a demanda de energia de todos os equipamentos elétricos da embarcação. As unidades de propulsão são acionadas localmente através de motores elétricos. Todo o sistema do navio é interligado através de cabos de força e de comando (Angioletti).

Figura 2 – Layout da Propulsão Diesel Elétrica



Fonte WEG

As principais vantagens da propulsão elétrica são:

- a) Redução de consumo, de emissão de poluentes e de custos de manutenção;
- b) Redução de tripulação – possibilita o incremento da automação com consequente redução de tripulação;
- c) Flexibilidade de projeto – os compartimentos de máquinas podem ser espalhados pelo navio, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo;

- d) Aumento da capacidade de sobrevivência do navio;
- e) Aumento da vida útil do navio;
- f) Redução da assinatura acústica.
- g) Capacidade de atender mudanças bruscas de cargas;
- h) Possibilidade de controle de velocidade (Alves, 2007)

3.2.1 Motores elétricos

O motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. É o mais usado, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos.

Figura 3 – Motor elétrico de propulsão



Fonte: ENIDH. Trindade, 2012

Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

a) Motores de Corrente Contínua – têm custo mais elevado e precisam de uma fonte de corrente contínua ou de um dispositivo que converta a corrente alternada disponível em contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão.

b) Motores de Corrente Alternada – são os mais utilizados, porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são:

- Motor Síncrono: funciona com velocidade fixa, sendo utilizado somente para grandes potências ou quando se necessita de velocidade invariável.
- Motor de Indução: funciona normalmente com uma velocidade constante que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas. (Almeida,2004)

3.2.1.1 Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico é uma máquina elétrica de corrente alternada muito utilizada no acionamento de cargas mecânicas. Sua grande vantagem é a capacidade de operar sem necessidade de contato com os enrolamentos do rotor, significando uma redução dos custos de manutenção (Cardoso, 2013).

É composto de estator e rotor. Normalmente, a alimentação do motor de indução trifásico é feita pelo estator e os enrolamentos do rotor podem ser do tipo “bobinado” ou “gaiola de esquilo” (Cardoso, 2013; Almeida,2004).

O rotor bobinado tem bobinas trifásicas no rotor e anéis coletores no eixo, de forma a permitir o acesso às correntes induzidas nos enrolamentos do rotor. Não aplicável em propulsão devido ao seu tamanho elevado (Cardoso, 2013; Angioletti).

O rotor tipo gaiola de esquilo é composto de barramentos condutores alojados em ranhuras do rotor e curto circuitados. São os motores escolhidos para a propulsão de navios. A ausência de contato elétrico entre o rotor e o exterior torna este motor bastante econômico e de baixa manutenção. A maior desvantagem é a dificuldade do controle de velocidade sem uso de dispositivos eletrônicos (inversores) (Cardoso, 2013; Angioletti).

3.2.1.2 Formas de partidas dos motores elétricos

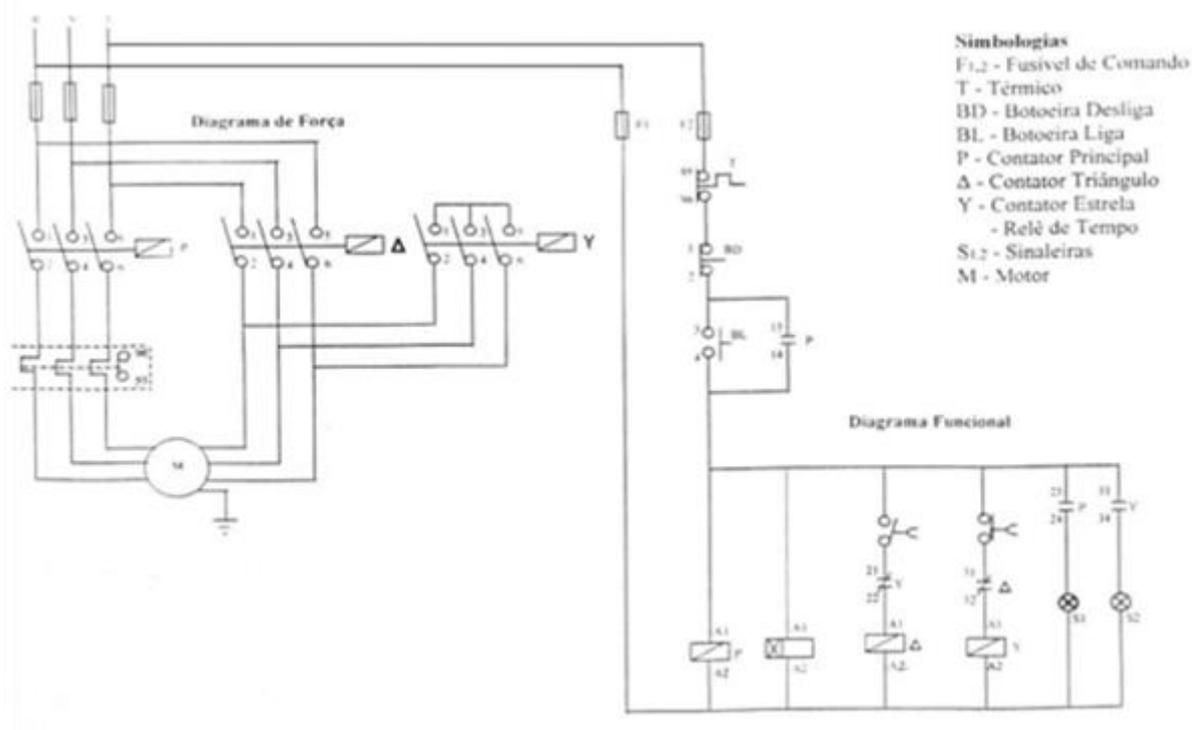
As formas mais comuns de partida dos motores elétricos são: sistema direto, estrela-triângulo e soft-start, sendo que os mais encontrados a bordo são o direto e o estrela-triângulo (Martins, 2008).

No sistema de partida direto os terminais do motor são conectados diretamente à rede no instante da partida, recebendo, portanto tensão nominal na partida, resultando em bom torque de partida, porém com os problemas da alta corrente, que podem provocar queda de tensão na rede de alimentação, podendo causar interferência em equipamentos ligados na mesma instalação. É o método de partida mais simples de implementar, pois não são empregados dispositivos especiais de acionamento, sendo, portanto, o de menor custo (Martins, 2008; Morais, 2002).

Para a partida com chave estrela-triângulo, é fundamental que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, por exemplo, 220/380V, 380/660V ou 440/760V; e tenham, no mínimo, 6 bornes de ligação. Sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com conjugado elevado. Existem casos em que esse tipo de partida não pode ser aplicado. É um sistema de custo reduzido, a corrente de partida é reduzida em 1/3 quando comparada com a partida direta e não existe limitação de número de manobras/hora. Porém, tem uma redução de torque de partida de aproximadamente 1/3 do nominal (Martins, 2013; Morais, 2002).

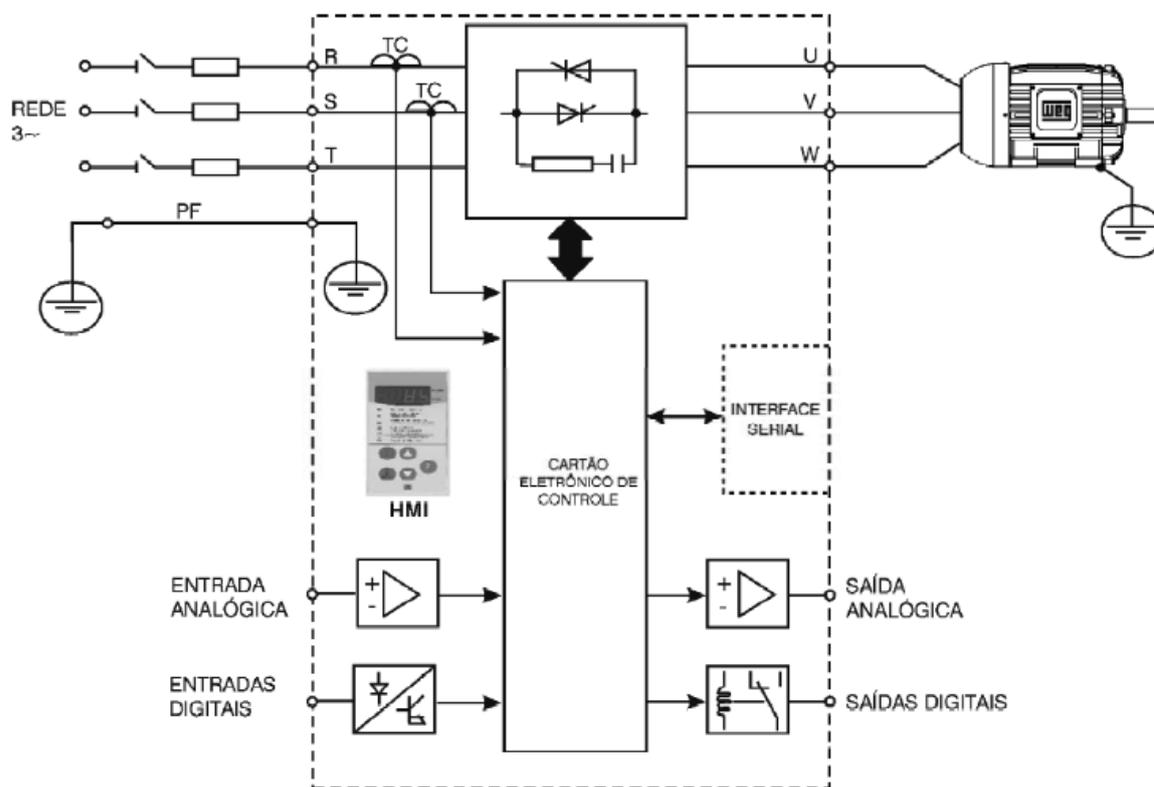
A chave de partida soft-star consiste de um conjunto de pares de tiristores (ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável aos terminais do motor durante a aceleração. No final do período de partida, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ao invés de ser submetido a incrementos ou saltos repentinos. Tem a corrente de partida e o torque de partida próximo ao nominal, não existe limitação do número de manobras/horas, tem longa vida útil e pode ser empregada para desacelerar o motor. No entanto, seu custo é maior à medida que a potência do motor é reduzida (Martins, 2008; Morais, 2002).

Figura 4 – Circuito básico estrela-triângulo



Fonte NEVES, 2013

Figura 5 – Bloco esquemático do soft start



Fonte Neves, 2013.

3.2.2 Conversores usados no setor naval

Os conversores de frequência mais utilizados no setor naval são: Cicloconversor (CA-CA), Inversor Fonte de Corrente (CSI) e Conversor Fonte de Corrente.

O Cicloconversor converte uma tensão e frequência de entrada fixa em grandezas variáveis de saída, em um único estágio de conversão (conversão direta) sem a necessidade da existência de um link de corrente contínua (CC). É aplicado geralmente em motores de grande porte e elevada potência, possui uma configuração padrão composta de duas pontes conversoras em antiparalelo por fase, totalizando seis pontes para um sistema trifásico (Angioletti).

O Cicloconversor é um sistema normalmente utilizado quando existe o requisito de uma boa resposta dinâmica a baixas velocidades, sendo portanto, bastante adequados para o uso em quebra-gelos e “ferries” (Freire; Ferreira, 2004).

O Inversor Fonte de Corrente é empregado extensivamente na indústria de navios de passageiros (transatlânticos), em faixas de potência de 1 MW até 100 MW.

O Conversor Fonte de Tensão com Modulação por Largura de Pulso (PWM) está dominando o mercado, pois entre as topologias de sistemas conversores é a que apresenta a melhor performance de acionamento para as mais variadas faixas de velocidade, e atualmente já estão disponíveis inclusive para níveis de média tensão (até 6.6 kV). Tem excelente aplicação em navios de pequeno e médio porte de potência de propulsão (Santos Júnior, 2006).

O sistema PWM caracteriza-se por um link de corrente contínua que é alimentado pelo sistema de corrente alternada através de um retificador utilizando diodos. Um banco de capacitores é usado para suavizar a tensão do link de corrente contínua e para minimizar o efeito de distorção harmônica gerado pelo inversor (Freire; Ferreira, 2004).

3.3 Propulsão híbrida (diesel mecânica + diesel elétrica)

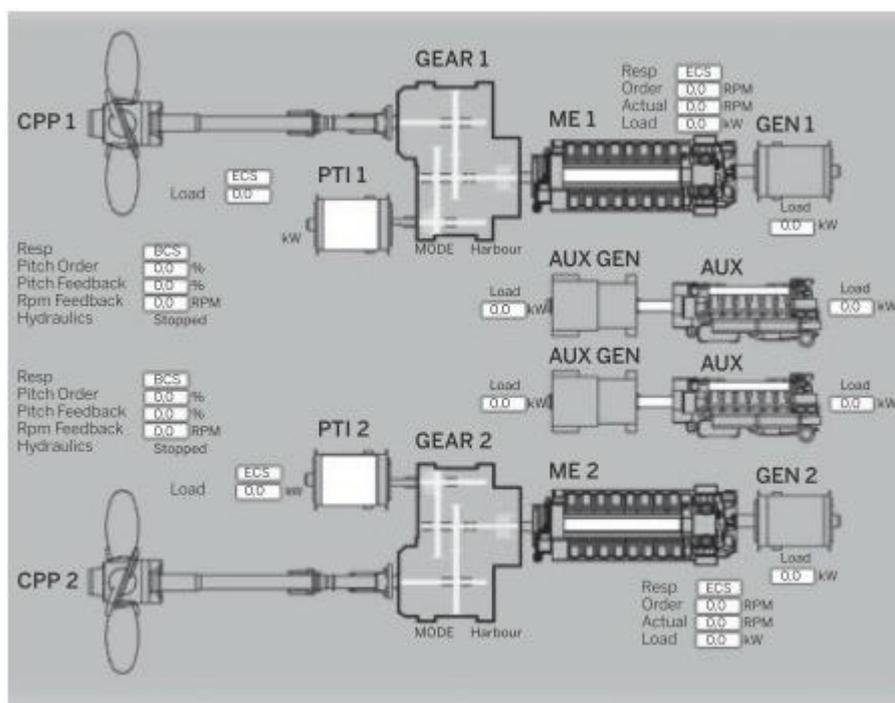
O sistema híbrido de propulsão ainda é pouco conhecido e utilizado no transporte marítimo comercial em comparação com os sistemas diesel-mecânico e diesel-elétrico. Também conhecido como sistema Diesel-Elétrico-Mecânico (DEM), se mostra como alternativa bastante interessante para embarcações em que as

operações alterne momentos de alta e baixa demanda de potência propulsiva, de embarcações que precisem de grande redundância de propulsão, mas nas quais a propulsão diesel-elétrica não seria eficiente, e de embarcações que possuem mais de um perfil operacional distinto (Barcellos, 2012).

Até pouco tempo atrás, quase todos os navios do tipo AHTS (Anchor Handling Tug Supply) eram construídos com sistema propulsivo do tipo Diesel-Mecânico. Por possuírem um diversificado perfil operacional, esses navios tinham grande desperdício de energia.

O sistema híbrido foi sendo estudado como uma possível solução para esses navios. Um fator importante do estudo foi que os custos de construção adicionais eram mais baixos quando comparados com os benefícios gerados, como a economia de combustível inerente a este sistema (Pinto, 2013).

Figura 6 – Arquitetura de sistema DEM para AHTS



Fonte Wärtsilä

É um sistema caracterizado pela mistura dos sistemas diesel-mecânico e diesel-elétrico, combinando o melhor dos dois sistemas e possibilitando à embarcação operar de forma eficiente em um cenário relativamente complexo. A parte mecânica é composta de motores diesel, caixas redutoras e geradores de eixo e a parte elétrica

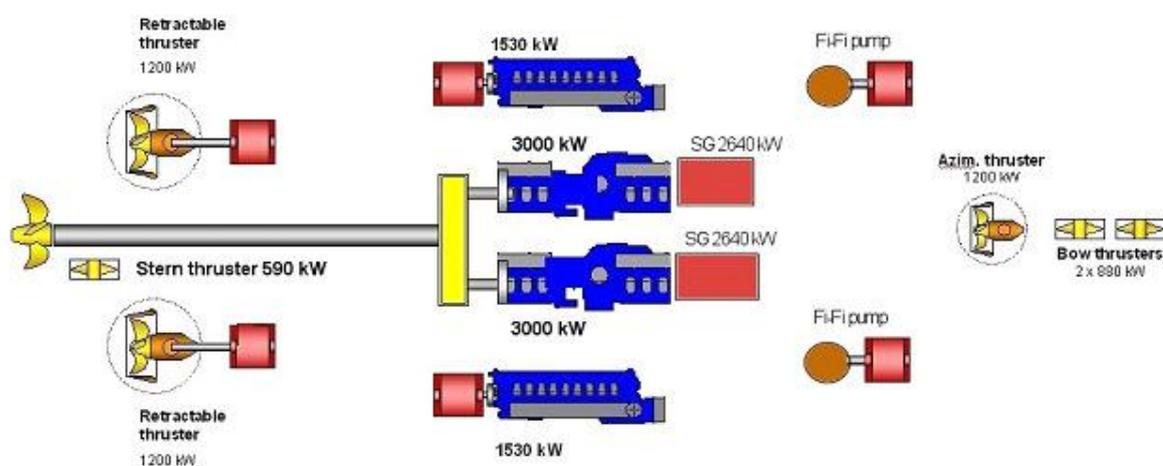
por motores elétricos e geradores auxiliares necessários para suprir a demanda elétrica da embarcação, juntamente com os geradores de eixo (Barcellos, 2012; Pinto, 2013).

Quando em trânsito, opera uma propulsão mecânica acionada através de uma única linha de eixo e caixa redutora. Quando em posicionamento dinâmico, a caixa redutora é desacoplada e os motores diesel passam a acionar geradores de eixo, com o navio mantendo posição através de impelidores laterais (thrusters) retráteis e de túnel acionados por motores elétricos (Barcellos, 2012).

3.3.1 Funcionamento do sistema híbrido em um PSV

Em navegação, os motores diesel acoplados à linha de eixo acionam a mesma, que transmite sua força a um único hélice de passo controlável e grande diâmetro. Nesse momento, a potência necessária para a carga de hotelaria e sistemas do navio pode tanto vir dos grupos geradores auxiliares, como dos geradores de eixo.

Figura 7 – Arquitetura típica de um sistema de propulsão DEM de um PSV



Fonte Wärtsilä

Quando da chegada na unidade que será abastecida, os dois motores de linha de eixo central são desconectados da mesma e passam a acionar somente os geradores de eixo, e a trabalhar em paralelo com geradores auxiliares, formando um sistema diesel-elétrico com quatro grupo de geradores. Os propulsores azimutais retráteis são abaixados e postos em funcionamento, sendo alimentados pela planta

de geração até a operação terminar. Neste momento, os propulsores retráteis são suspensos para dentro do casco novamente, e os motores centrais são acoplados à linha do eixo, quando a embarcação então parte para seu próximo destino com a propulsão diesel-mecânica em funcionamento (Barcellos, 2012).

3.4 Elementos propulsores

3.4.1 Hélice de passo fixo (FPP)

São constituídos por três ou mais pás rigidamente fixadas ao cubo.

Com a utilização do hélice de passo fixo, a velocidade do navio é regulada pela variação da velocidade de rotação do hélice e por isso da máquina principal. A paragem e a inversão da marcha do navio, implica normalmente na paragem e novamente no arranque da máquina principal em sentido contrário (Baptista, 2013/2014)

Figura 8 – Propulsor de passo fixo



Fonte: ENIDH; Baptista, 2013/2014

3.4.2 Hélice de passo variável ou controlável (CPP)

A ideia básica de funcionamento do hélice de passo variável é a variação de ataque das pás do hélice (Martins, 2008)

As pás montam-se separadamente no cubo e podem sofrer deslocamento

angular durante a rotação do hélice.

O início da marcha, a regulação de velocidade, a paragem e a inversão de marcha do navio, realiza-se sem a necessidade de parar a máquina principal (Baptista, 2013/2014)

É um sistema com tecnologia de resposta rápida, e níveis de ruídos e vibrações próximos do zero. São extremamente robustos para operar nas adversidades do mar e com baixo custo de manutenção, podendo ser utilizados em diversos tipos de embarcações. O passo é controlado por um mecanismo hidráulico dentro do cubo e não há necessidade de caixas inversoras. O impulso é controlado pelo passo da hélice, tornando a velocidade de navegação mais eficiente (Melo, 2012).

Figura 9 – Propulsor de passo variável



Fonte: Melo, 2012

Uma grande vantagem do hélice de passo variável em relação ao hélice de passo fixo é que ele pode se adaptar às condições de operação que influenciam a curva de carga do motor, tais como: resistência do casco, condições meteorológicas, profundidade, calado, condições de carga, de mar, alteração de combustível, aumento de sujeira e rugosidade no casco e nas pás do hélice. Por causa dessa capacidade de adaptação o hélice de passo controlável proporciona um aumento na vida do motor, uma diminuição nos custos de manutenção do motor, maior manobrabilidade, diminuição de ruídos e suavidade na operação (Martins, 2008).

São indicados para navios que tenham que modificar com frequência suas condições de operação, como por exemplo, rebocadores, arrastões, ferries e navios de cruzeiro (Baptista, 2013/2014).

O método mais eficiente para reduzir ruídos e vibrações induzidos ao casco, sem diminuir a eficiência propulsiva e de manobra, é projetar um hélice de passo variável com pás highly skewed. São pás que têm certo grau de assimetria. Na região da metade das pás, possuem certa puxada para vante, formando uma barriga, enquanto nas pontas tem uma acentuada curvatura voltada para ré (Martins, 2008).

3.4.3 Hélice em tubeira

O hélice trabalha dentro de uma tubeira que pode estar fixa ou não ao casco do navio. A forma geométrica da tubeira é ligeiramente cônica a fim de acelerar o escoamento da água em seu interior.

É usado em navios que necessitam de grande capacidade de tração a baixas velocidades, como os rebocadores, os arrastões e as barcaças (Baptista, 2013/2014)

3.4.4 Hélice vertical (Sistema Voith Schneider)

Esse sistema é aplicável principalmente em rebocadores.

Figura 10 – Propulsor Voith Schneider



Fonte Voith

O sistema Voith Schneider é composto de dois conjuntos de lâminas verticais móveis fixados em discos paralelos ao fundo do rebocador. São localizados na mesma linha transversal e geralmente, à vante. Os discos giram em velocidade constante, produzindo uma força de intensidade e sentido controlados através da variação do ângulo de cada uma das lâminas (Martins, 2008)

Tem como vantagens o bom controle de força de impulso, boa manobrabilidade e a velocidade com que as alterações do sentido de aplicação e da intensidade da força podem ser feitas.

As desvantagens são: grande calado, formato do fundo do casco, reto e largo, que pode prejudicar a hidrodinâmica e uma relação entre tração estática e potência de motor inferior a de outros sistemas propulsores (Martins, 2008; Baptista, 2013/2014)

3.4.5 Azimutais

Azimutal é um propulsor capaz de girar 360° dispensando o uso do leme e dando maior manobrabilidade à embarcação (Melo, 2012).

Esses propulsores começaram a ser largamente empregados com o avanço tecnológico da eletrônica de potência, que desenvolveu elementos de controle para maiores potências. Eles podem ser simples ou contra-rotativos, com passo fixo ou variável e possuir bocal, entre outras variações (Moratelli, 2010)

As disposições de transmissão do azimutal podem ser:

- a) Tipo Z: possuem a máquina motriz com o eixo na posição horizontal. O torque é transmitido ao propulsor por meio das duas caixas de transmissão, uma conectada ao eixo do motor, que por sua vez está na estrutura de suporte ou sobre o topo do atuador, e a outra caixa de transmissão está na direção da linha do eixo propulsor. Essa forma de transmissão é chamada de Z-drive porque o movimento de rotação tem que fazer duas voltas em ângulo reto, assemelhando-se, assim, à letra Z.
- b) Tipo L: o azimutal tem sua máquina motriz na posição vertical e possui uma única caixa de transmissão de engrenagens, localizada na linha horizontal do eixo do propulsor. É chamada de L-drive porque o movimento de rotação tem que fazer um giro de 90°, parecendo a letra L (Melo, 2012; Moratelli, 2010)

Quanto à disposição do azimutal, ele pode ser do tipo empurrador, em que o propulsor está à frente do fluxo gerado e do tipo puxador, em que o propulsor é instalado à ré do fluxo gerado. O tipo puxador tem melhor desempenho e menores problemas de cavitação e vibração. Porém, seu arranjo é direccionalmente instável, necessitando de leme para que seja atingido o equilíbrio direccional (Moratelli, 2010).

3.4.5.1 POD e AZIPOD

POD é um sistema de propulsão elétrica em que o motor elétrico de propulsão fica instalado dentro do POD (podded drive) e, portanto, dentro da água (Martins, 2008).

Segundo Pêgo et al, 2005 apud Melo, 2012, o primeiro projeto de POD propulsor foi concebido em 1995, quando Pleuger e Busmann projetaram o sistema e o patentearam nos Estados Unidos.

Em 1990, a ABB lançou no mercado o mesmo conceito de propulsão aprimorado para aplicações comerciais denominado Azipod. Seu princípio é a substituição do hélice com eixo fixo por um propulsor que pode mudar o sentido de sua corrente de descarga dirigindo sua força para qualquer ponto do azimute da embarcação (Martins, 2008; Melo, 2012).

Figura 11 – Propulsores azimutais



Fonte: ENIDH –Trindade,2012

É um modelo de propulsão revolucionário em comparação com a propulsão convencional. A interação entre a propulsão e direção é tão boa que é comum observar embarcações com este sistema navegando de popa ou mesmo de lado (Martins, 2008).

As vantagens desse sistema são:

- a) Aumento de espaço no casco que antes era reservado para propulsão convencional;
- b) Liberdade de projetos mais criativos, uma vez que os propulsores não requerem uma conexão direta com o motor principal;
- c) Excelentes características de manobrabilidade e desempenho hidrodinâmico;
- d) Eliminação da necessidade de longas linhas de eixo, bem como lemes, hélices laterais, hélices de passo variável e engrenagens redutoras;
- e) Possibilita projetos de cascos mais simples;
- f) Menor quantidade de cilindros de motor para manter;
- g) A flexibilidade de operação conduz a menor consumo de combustível, menor custo de manutenção e menos emissão de gases;
- h) Diminuição de ruído e vibração
- i) Excelente capacidade de reversão durante a navegação a ré e melhor resposta no caso de desaceleração (Martins, 2008; Valle Filho, 2011).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas propulsivos vêm sendo estudados cada vez mais, com o intuito de escolher o que melhor se adequa às diversas embarcações que a cada ano são lançadas no mercado.

O sistema diesel-mecânico é o sistema propulsivo mais usado em embarcações que necessitam de “força bruta”, de grande potência propulsiva, que produzam tração estática (Bollard Pull) necessária para atividades como reboques de unidades flutuantes e/ou outras embarcações e que necessitam de fixação de âncoras em solo marinho, como por exemplo, os navios AHTS.

O sistema diesel-elétrico normalmente é utilizado em embarcações que necessitem de alto grau de manobrabilidade e de posicionamento dinâmico. É um sistema que tem um alto custo de desenvolvimento inicial e de diluição risco, mas em contrapartida, tem um bom custo de vida útil.

A propulsão elétrica vem sendo muito estudada devido às diversas vantagens desse sistema, como por exemplo, a redução de consumo de combustível, de emissão de poluentes, de custo de manutenção, da redução da tripulação, do aumento da vida útil do navio, do aumento da capacidade de sobrevivência do navio, dentre outras.

O sistema híbrido é uma alternativa de propulsão que é relativamente pouco conhecida e utilizada no transporte marítimo em comparação com os sistemas diesel-mecânico e diesel-elétrico. Seu uso se adequa melhor em navios que necessitam, ora de baixa, ora de alta demanda de potência propulsiva e em embarcações que necessitam de perfil operacional distinto. O emprego desse sistema requer cuidadosa análise devido à maior complexidade de instalação.

Desse modo, é difícil dizer qual o melhor sistema propulsivo existente no mercado marítimo. O mais adequado é analisar qual sistema que melhor se adapta à determinada embarcação e perfil operacional utilizado, visando dessa forma, melhor rendimento da embarcação, com menor custo efetivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Júlia Martins Lira; MENDES, Davi de Melo Pontes. **Estudo do emprego do propulsor cicloidal Voith Schneider nas embarcações de apoio marítimo**. Belém: Centro de Instrução Almirante Braz de Aguiar; 2012.

ALMEIDA, Antônio Tadeu Lyrio. **Motores elétricos**. Itajubá, 2004. Universidade Federal de Itajubá Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAA82gAA/motores-eletricos>>. Acesso em: 09 out. 2014.

ALVES, Renata Nunes. **Propulsão elétrica de navios**. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Engenharia do Rio de Janeiro; 2007.

ANGIOLETTI, Malco Adriano. **Eletricidade naval**. Disponível em: <http://www.eletricidade.in/2-aulas_pdf/apostilas/eletricidade_navai.pdf>. Acesso em: 24 set. 2014.

BAPTISTA, Luís Filipe. **Tecnologia Marítima: sistemas de propulsão e governo**. Paços D'Arcos, Lisboa: ENIDH; 2013/2014. Disponível em <www.enautica.pt/publico/professores/.../SlidesCap5-SistPropulsao.pps> Acesso em: 01 out. 2014.

BARCELLOS, Renato. **O sistema híbrido de propulsão como uma alternativa viável aos sistemas diesel-elétrico e diesel-mecânico**. Anais do 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore; 2012 out 15-19; Rio de Janeiro.

CÂNDIDO, Igor Souza. **Projeto integrado de sistema propulsivo com requisito de tração estática**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.2012.

CARDOSO, Denis Osório. **Inversores de frequência aplicados a embarcação diesel elétrica**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha; 2013.

CARVALHO, Amauri Dias. **Acionamentos industriais**. São Paulo, 2006. CEFET-SP. UNED Cubatão.

FONSECA, Maurílio Magalhães. **Arte naval**. 7ª ed. Rio de Janeiro. 2005. Serviço de Documentação da Marinha.

FREIRE, Paulo Eduardo Meirelles e FERREIRA, César Leal. **Propulsão elétrica: histórico e perspectivas futuras**. Anais do 20º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore; 2004 nov. 08-12; Rio de Janeiro.

KING, Brian W. **Propulsion systems**. Elliot BAY Design Group. April,1998. Pag:1-9.

MARTINS, Igor Estevão Lotti. **Modernos sistemas de propulsão em navios Mercantes**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha; 2008.

MELO, Alex Eustáquio. **Análise da propulsão diesel elétrica em embarcações de apoio marítimo**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha; 2012.

MONTFORT, Gustavo von. **Seleção de sistema propulsivo em casco de deslocamento**: uso de formulações clássicas e resultados de medição. Rio de Janeiro: Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2014.

MORAIS, Airton Almeida. **Comandos elétricos**: teoria e atividades práticas. São Paulo, 2002. Schooltech. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAE3BsAH/apostila-comandos-eletricos>>. Acesso em: 09 out. 2014.

MORATELLI JÚNIOR, Lázaro. **Principais fatores do projeto de navios aliviadores com sistema de posicionamento dinâmico**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2010.

NEVES, Vítor Rodrigues. **Propulsão Elétrica**. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha; 2013.

PASSOS, Rafael de Barros. **Propulsão Elétrica**. Rio de Janeiro: Universidade do Rio de Janeiro; 2013.

RODRIGUES, Leevan. **Tecnologia Marítima**: instalações propulsoras. Cabo Verde: Universidade de Cabo Verde; 2011/2012.

SANTOS JÚNIOR, Enoc Dias. **Motor diesel**. Salvador, 2006. Senai Cimatec. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAE7qgAG/senai-ba-motor-diesel?part=2>>. Acesso em 09 out. 2014.

SILVA, João Emílio C. **Tecnologia marítima**: equipamentos e sistemas do navio. Paço D'Arcos, Lisboa: ENIDH; 2007. Disponível em <http://www.enautica.pt/publico/professores/baptista/TecMar/cap6_tecmaritima.pdf> Acesso em: 01 out. 2014

SOUZA, Felipe Arcoverde Coelho. **Avaliação de sistemas diesel elétrico, mecânico e híbrido para embarcações de apoio a plataformas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Engenharia Naval e Oceânica; 2013.

TEIXEIRA, João Reus de Pinho. **Sistemas propulsores**: diesel elétrico, diesel mecânico e híbridos, evolução no mundo naval *offshore*. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha; 2014.

TRINDADE, Jorge. **Hidrodinâmica e propulsão**: engenharia de máquinas marítimas. Paço D'Arcos, Lisboa: ENIDH; 2012. Disponível em: <<http://www.enautica.pt/publico/professores/jorgetrindade/HidroProp/Docs/HidroPropulsao.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2014.

VALLE FILHO, Gilberto Dória do. **Avaliação das instalações de máquinas em navios visando redução do uso de combustível fóssil.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2011.

VOITH. **Voith Schneider propeller.** Disponível em: <<http://voith.com/en/products-services/power-transmission/voith-schneider-propeller-10002.html>>
Acesso em: 01 out. 2014.

WÄRTISILÄ. Disponível em: <<http://wartsila.com/en/marine-solutions/overview>>.
Acesso em: 26 set. 2014.

WEG, **Soluções WEG para indústria naval.** Disponível em <<http://weg.com>>.
Acesso em: 26 set. 2014.