

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

**TALITA GONÇALVES DA COSTA**

**MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO EM NAVIOS MERCANTES**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**TALITA GONÇALVES DA COSTA**

**MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO EM NAVIOS MERCANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso 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.

Orientador: Professor/Engenheiro Hermann  
Regazzi Gerk

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**TALITA GONÇALVES DA COSTA**

**MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO EM NAVIOS MERCANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso 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: Professor/Engenheiro Hermann Regazzi Gerk

---

Assinatura do Orientador

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

Dedico este trabalho a pessoa mais importante da minha vida aqui nessa Terra, pessoa esta que me ensinou o caminho correto desde criança e que eu amo muito, minha mãe. Dedico também aos meus familiares que sempre estiveram por perto dessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me orientar e guiar. Agradeço aos mestres que estiveram todo comprometimento e dedicação em suas disciplinas. Aos colegas, que durante o curso compartilharam suas experiências e pelo companheirismo dedicado por todos.

“Tente uma, duas três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça aquilo que a maioria não faz.”

Bill Gates

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo dos diferentes tipos de propulsão em embarcações mercantes modernas. São comparadas a propulsão mecânica tradicional, a propulsão diesel elétrica e a propulsão híbrida, com o objetivo de encontrar o melhor tipo de propulsão dependendo de alguns fatores como consumo de combustível e emissão de poluentes, buscando a maior eficiência da embarcação, mostrando as vantagens e desvantagens para que se obtenha maior efetividade.

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

## **ABSTRACT**

This study presents a study of different types of propulsion in modern merchant vessels. Compared traditional mechanical propulsion, diesel and electric propulsion and hybrid propulsion, with the goal of finding the best type of propulsion depending on factors such as fuel consumption and emissions, seeking greater efficiency of the vessel, showing the advantages and disadvantages in order to obtain greater effectiveness.

**Keywords:** Mechanic. Electric. Hybrid. Propulsion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistema de Acionamento Elétrico Integrado (Arquivo pessoal)	11
Figura 2 -	Diagrama de eficiência no consumo em relação a carga na propulsão (Arquivo pessoal)	14
Figura 3 -	Propulsão Diesel Elétrica (Fonte: Wartsila)	15
Figura 4 -	Sistema tradicional e Sistema de Propulsão Elétrica Wärtsilä (Fonte: Wärtsilä)	20
Figura 5 -	Sistema de Propulsão Elétrica Wärtsilä (Fonte: Wärtsilä)	22
Figura 6 -	Propulsão Diesel Mecânica (Fonte: Wartsila)	23
Figura 7 -	Equipamentos Sistema Híbrido (Fonte: Wartsila)	25
Figura 8 -	Tipos de Operação para Sistemas Híbridos (Fonte: ABB)	25
Figura 9 -	Modo de Navegação a 12 nós (cortesia Wärtsilä)	29
Figura 10 -	Modo de Posicionamento Dinâmico Diesel-Elétrico (cortesia Wärtsilä)	30
Figura 11 -	Modo operacional 100% (cortesia Wärtsilä)	30
Figura 12 -	Redução da Emissão de Poluentes (Arquivo Pessoal)	32

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>COMPARAÇÃO ENTRE PROPULSÃO ELÉTRICA E A PROPULSÃO MECÂNICA</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>O uso da propulsão elétrica</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Propulsão elétrica em corrente contínua</b>	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Propulsão elétrica em corrente alternada</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Conceito de baixa perda da Wärtsilä</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>SISTEMA DIESEL MECÂNICO</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>SISTEMA HÍBRIDO (DIESEL MECÂNICO + DIESEL ELÉTRICO)</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>O uso da propulsão híbrida</b>	<b>26</b>
<b>5.2</b>	<b>Vantagens da propulsão híbrida</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema propulsivo de uma embarcação é de suma importância, pois além de ser o elemento funcional responsável por promover o deslocamento da embarcação, influencia na viabilidade econômica desta, uma vez que está intimamente ligada ao seu custo operacional.

Os sistemas propulsivos mais encontrados em embarcações mercantes são: Sistema Diesel Elétrico, Sistema Diesel Mecânico e Sistema Híbrido. O primeiro é composto por geradores elétricos e cabos de transmissão, o segundo por motores diesel e linhas de eixo e o terceiro é mescla dos dois primeiros, sendo composto tanto por motores diesel quanto por geradores elétricos.

A escolha do sistema propulsivo a ser utilizada em uma embarcação está ligada ao perfil operacional e contexto geográfico ao qual essa embarcação esta inserida, onde o perfil operacional são as atividades que a embarcação estará sujeita a realizar e o contexto geográfico a área de atuação dela.

No presente trabalho serão avaliados e explicitados os diferentes tipos de Sistema Propulsivo, mostrando suas características e suas especificidades, comparando-os quanto ao consumo de combustível de acordo com seu perfil operacional demonstrando assim os impactos em seu custo operacional.

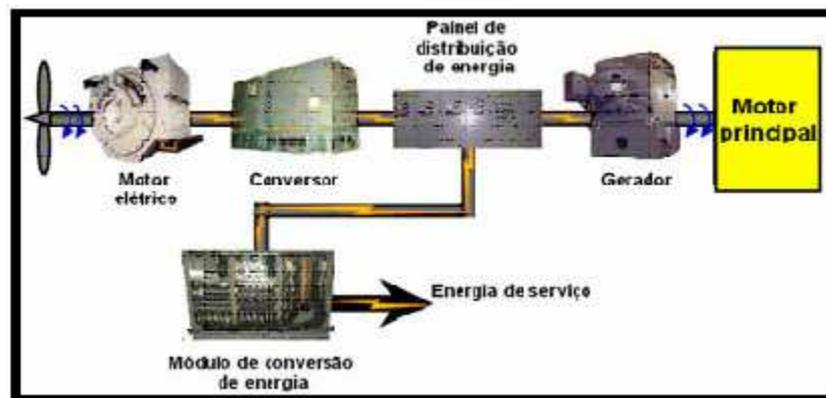
## 2 COMPARAÇÃO ENTRE PROPULSÃO ELÉTRICA E A PROPULSÃO MECÂNICA

Propulsão Elétrica é um sistema constituído por um gerador elétrico, acionado por um dispositivo de acionamento principal, que fornece energia para um motor elétrico que aciona o hélice do navio. A principal característica deste sistema é o controle da velocidade do navio pelo controle da rotação do motor elétrico.

O Sistema de Propulsão Elétrica, em vez de dois sistemas de potência separados, cada um com sua limitação de carga específica, passa a dispor de uma capacidade de geração única que pode ser distribuída com maior flexibilidade.

A Propulsão Elétrica pode ser descrita de forma mais precisa como a transmissão elétrica de potência entre o dispositivo de acionamento principal e a carga representada pelos propulsores do navio. Este sistema de propulsão consiste essencialmente na transmissão elétrica para a mudança entre a alta velocidade e baixo torque do dispositivo de acionamento principal para a baixa velocidade e elevado torque requerido para girar os propulsores.

**Figura 1 - Sistema de Acionamento Elétrico Integrado**



Fonte: Arquivo pessoal.

Nos navios dotados de Propulsão Mecânica tradicional, a rotação do motor é que define a rotação do hélice, portanto, o motor em algumas condições de operação não opera na faixa do rendimento ótimo, gerando desta forma um inevitável desperdício de combustível.

No sistema de propulsão mecânica convencional, o dispositivo de acionamento principal a ser empregado é acoplado diretamente ao eixo propulsor do navio através da

engrenagem redutora. Este dispositivo pode ser uma turbina a vapor, um motor diesel, ou uma turbina a gás.

Neste tipo de configuração do sistema de propulsão é necessário um diesel gerador auxiliar, instalado em local separado do sistema de propulsão, que fornecerá a potência elétrica para o atendimento dos demais equipamentos auxiliares de bordo.

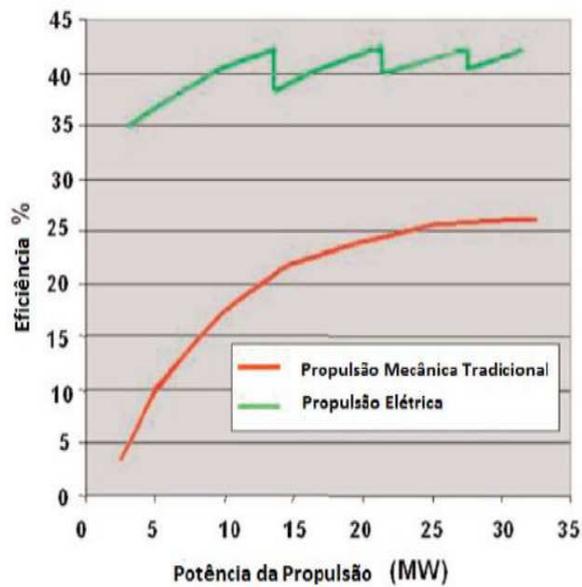
### 3 A PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA

A propulsão Diesel Elétrica é normalmente utilizada em embarcações em que aspectos como alto grau de manobrabilidade e a necessidade do sistema de DP (Dynamic Positioning) fazem com que a escolha de um sistema não convencional seja o melhor, caso típico de PSV's (Platform Supply Vessel). O sistema é composto basicamente por Gerador Diesel Elétrico, painéis de distribuição, cabos de transmissão além de propulsores do tipo azimutais. Tal sistema apresenta as seguintes vantagens:

- Aumento da capacidade de sobrevivência no mar, ocasionado pelo redirecionamento do sistema de potência em caso de avaria na carga/máquina;
- Melhoria da eficiência e redução do consumo de combustível. Os acionadores primários podem operar no ponto de melhor rendimento independentemente da velocidade de rotação da hélice, aliado ao fato de que já não existem mais conexões mecânicas entre o motor e o eixo propulsor, o que diminuem as perdas;
- Redução da vibração pela inexistência de conexão mecânica entre o motor e o casco;
- Redução de Custos: não há necessidade de motores elétricos auxiliares, como no caso da propulsão mecânica. O sistema também permite que sejam utilizados todos os dispositivos de acionamento principal nas altas velocidades e nas velocidades baixas e que sejam desligados os que não forem necessários;
- Economia de espaço: alta relação potência/peso para as máquinas elétricas, permitindo um melhor rearranjo do navio, com ganho de acomodações para a tripulação;
- Redução da assinatura acústica: não existem mais engrenagens redutoras, o que leva a um navio com menores níveis de ruído.

Com o uso da propulsão elétrica, o motor primário pode operar no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice. Em virtude da extinção da conexão mecânica entre motor primário (que gera potência através da queima de combustível) e o eixo propulsor, não existe mais relação direta entre a velocidade do eixo do motor primário e a rotação do hélice.

**Figura 2 - Diagrama de eficiência no consumo em relação a carga na propulsão**



Fonte: Arquivo pessoal.

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros, podendo inclusive ser instalados em compartimentos diferentes. Dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas nas partes mais altas do casco, deixando apenas o motor elétrico junto ao fundo do casco conectado ao propulsor.

Com a flexibilização, torna-se desnecessário concentrar equipamentos em praças de máquinas principais; sendo possível espalhar os compartimentos de máquinas pela embarcação de apoio marítimo, em áreas menos críticas, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo.

A modularidade e a flexibilidade proporcionam um sistema de geração de energia e de sistemas redundantes, distribuídos e reconfiguráveis. Consequentemente, os danos em um compartimento de máquinas, sejam provocados por incêndio, alagamento, colisão ou simples mau funcionamento, podem facilmente ser detectados e “by-passados”, mantendo o funcionamento do sistema para o afastamento de uma unidade, por exemplo. A facilidade para o redirecionamento da energia elétrica a bordo, possibilita uma gama de possibilidades de ações para minimizar os efeitos decorrentes de múltiplas falhas simultâneas, propiciando redundâncias.

Abaixo pode ser verificada uma ilustração esquemática do Sistema Propulsivo Diesel Elétrico:

**Figura 3 - Propulsão Diesel Elétrica**



Fonte – Wartsila.

### 3.1 O uso da propulsão elétrica

Após a segunda guerra mundial, rebocadores de apoio à plataforma foram produzidos com um arranjo de propulsão similar aos de propulsão elétrica, porque tinha a vantagem de permitir variações suaves, pequenas e precisas na rotação do eixo propulsor, característica muito importante em reboque e operações com plataformas em alto mar.

Muitas embarcações de apoio marítimo, constantemente, precisam ser mantidas numa mesma posição relativa à plataforma durante muito tempo. Também se sabe que essa situação é arriscada e o seu controle se torna bem difícil. O vento, o estado do mar, as diferentes áreas de superfície vélica das estruturas expostas ao vento, dentre outros fatores, tornam extremamente difícil manter duas embarcações sem qualquer movimento relativo entre elas.

Na década de 70 começaram a surgir soluções para auxiliar as embarcações de apoio marítimo no seu fim junto às plataformas. Em meio a essas soluções, veio o posicionamento dinâmico onde um processador digital recebe informações de uma referência, como o Sistema Global de Posicionamento ou outra referência na plataforma e ainda, informações da agulha giroscópica e do anemômetro da embarcação. O posicionamento dinâmico aciona as máquinas do navio para manter a embarcação em uma posição relativa à plataforma.

Além do problema citado acima, existe a dificuldade dos navios antigos, com um e com dois hélices na popa, terem uma imensa dificuldade para se deslocarem lateralmente.

Os navios mercantes mais comuns usam rebocadores portuários para esse deslocamento lateral no momento da atracação ou desatracação. Mas dependendo do local e tipo de faina onde é empregada a embarcação de apoio marítimo, a utilização de um rebocador para auxiliar a manobra é difícil e, com certeza, muito custosa.

Uma solução que vem sendo muito utilizada para os problemas acima citados é a utilização dos hélices transversais, ou laterais, na proa e na popa ("bow thruster" e "stern thruster"). Algumas embarcações possuem vários desses hélices. Existem "thrusters" acionados por motores hidráulicos e por motores elétricos diretamente, entretanto a solução elétrica para os "thruster" na costa brasileira prepondera em virtude da maior rapidez de resposta e dimensões menores, embora em muitos casos precise empregar altas tensões elétricas.

Essa alta tensão elétrica normalmente ocorre no momento de uma reversão de marcha durante uma manobra, os motores de propulsão elétrica, de corrente alternada, com motor de indução tem altíssimas correntes de partida. A solução encontrada foi incorporar um hélice de pás variáveis acionadas pelo motor elétrico de propulsão. O posicionamento dinâmico varia o passo do hélice além da rotação do motor elétrico.

Outro problema ligado a corrente alternada é que ela se opõe as variações de corrente da linha e/ou do barramento.

Seria possível diminuir o problema da corrente alternada com a separação da planta elétrica, uma para cada eixo, mas, mesmo assim, o paralelismo do motor de combustão principal (MCP) no barramento poderia ser derrubado pelas flutuações de carga e / ou pelos harmônicos decorrentes.

Para dar uma solução a essas questões da corrente elétrica foi lançado no início do século XXI o sistema AZIPOD com energia gerada em corrente alternada (CA), distribuída para todo o navio, inclusive para os QEPs (quadro elétrico principal). Mas, antes de chegar aos QEPs, ela é retificada para corrente contínua (CC) e, logo em seguida invertida para corrente alternada (CA), com tensão e frequência adequada à tarefa da ocasião. O AZIPOD é capaz de girar 360 graus em torno do seu suporte vertical. Desse modo as embarcações

dispensam a existência de muitas partes móveis para a transmissão, e leme, e ainda elimina a necessidade de "thruster" lateral a ré.

### **3.2 Propulsão elétrica em corrente contínua**

Ainda hoje existem embarcações que trabalham com propulsão e instalações em corrente contínua, devido a melhor capacidade de manobra por possibilitar uma variação suave da velocidade, especialmente na partida. Essa suavidade é fundamental para os rebocadores que em suas fainas evitam causar avarias no costado do navio que empurram, por evitarem o choque com muita força de encontro ao costado do navio apoiado.

Os rebocadores com propulsão elétrica em corrente contínua tem os motores diesel sempre operando, acionando o gerador elétrico principal, mesmo com o navio atracado ou fundeado. O acionamento dos hélices propulsores pelos motores elétricos principais pode ser feito lentamente, RPM por RPM, a partir do zero, ajustando o deslocamento do rebocador conforme as necessidades da faina, para evitar choques bruscos no cabo ou no dispositivo de reboque, para não rompê-lo.

A propulsão elétrica em corrente contínua possui uma grande desvantagem por possuir coletor (comutador) de teclas e escovas. O uso contínuo e as grandes variações de corrente em manobras, por exemplo, provocam um desgaste acelerado de ambos, ocasionando uma manutenção frequente, cara e complexa.

Na medida em que o atrito entre escova – coletor provoca o desgaste da escova, as centelhas começam a surgir, desde uma pequena centelha até várias grandes. O processo é cumulativo, aumentando exponencialmente as centelhas e, conseqüentemente, o calor produzido. Se esse calor for exagerado, ele pode avariar o coletor do motor.

Os geradores elétricos de propulsão e os motores elétricos de propulsão em corrente contínua não podem ser enclausurados como os motores elétricos de corrente alternada do tipo gaiola de esquilo. O calor gerado pela comutação escovas – coletor, mais o calor dos campos da máquina, precisam ser dissipados, o que normalmente é feito por uma ventoinha. A circulação de ar introduz nos campos da máquina o pó produzido pelo atrito da escova de encontro ao coletor e até mesmos pequenos pedaços das escovas. Desse modo, além da umidade e poeira da praça de máquinas, o gerador e o motor elétrico de propulsão recebem uma grande quantidade de partículas de carbono e, ocasionalmente, algum corpo estranho. Por

isso, essas máquinas são muito mais vulneráveis às baixas resistências de isolamento nos seus campos.

### **3.3 Propulsão elétrica em corrente alternada**

A propulsão em corrente alternada tem um efeito indesejável, especialmente durante as variações de carga elétrica, que são os harmônicos de frequência, dentre outros problemas. Do ponto de vista do consumo de energia, os harmônicos não trazem maiores problemas, mas, no caso dos sinais ou informações empregadas pela automação, os harmônicos são prejudiciais. Eles induzem sinais falsos nos sensores da automação, e esses por sua vez provocam reações incorretas da automação, do que resulta a instabilidade dos geradores elétricos de propulsão em paralelo no barramento.

Na propulsão elétrica a maior variação de carga ocorre, principalmente, nas variações de velocidade e sentido de rotação das máquinas durante as manobras do navio. É então que a instabilidade no paralelo dos geradores elétricos pode desligar toda a geração de energia do navio.

A solução elaborada para evitar esse excesso de corrente é a utilização de motores elétricos com sistemas azimutais. Esse tipo de propulsão é usado, majoritariamente, em navios incomuns, cuja operação é bastante irregular ao longo de um período de tempo, devido ao custo-benefício ser menor quando comparado com o motor diesel, por exemplo.

O hélice lateral, que é movido por motor elétrico em corrente alternada, localizado na proa não é muito utilizado em navios comuns porque o equipamento é inútil em velocidades acima de quatro a seis nós e ainda fica parado por muitos dias ou semanas, sem uso, em local muito exposto a umidade. A validade do uso de bow thruster no navio comum vai depender, dentre outros motivos, da redução de custos obtida com a menor quantidade de rebocadores portuários e a frequência com que o navio manobra nos portos.

Quase sempre, a carga elétrica dos navios é maior do que a capacidade de um gerador. Faz-se preciso então ter vários geradores em barra e distribuir a carga elétrica total entre eles. A necessária distribuição da carga elétrica é feita pelo distribuidor de carga, que vem sendo enquadrado como controladores lógicos programáveis (CLP ou PLC).

O distribuidor mantém a carga elétrica do navio dividida equilibradamente entre todos os geradores conectados em paralelo no barramento do quadro elétrico principal. Nas embarcações que possuem geradores elétricos de propulsão com capacidades diversas a distribuição de carga é feita proporcionalmente a capacidade dos geradores.

Desse modo fica evidente que o distribuidor de carga é um elemento essencial à propulsão nos navios com propulsão elétrica e vários geradores. A energia disponível no barramento do navio para os motores elétricos é retificada e depois encaminhada para um inversor que entrega a energia elétrica aos motores elétricos em 440 volts CA, 60 Hz.

A transmissão de energia para os motores elétricos acima descritos, aparentemente tortuosa, se destina a impedir o surgimento dos harmônicos de frequência no barramento do quadro elétrico principal, harmônicos esses induzidos pela variação de carga nos motores elétricos, especialmente durante as manobras da embarcação.

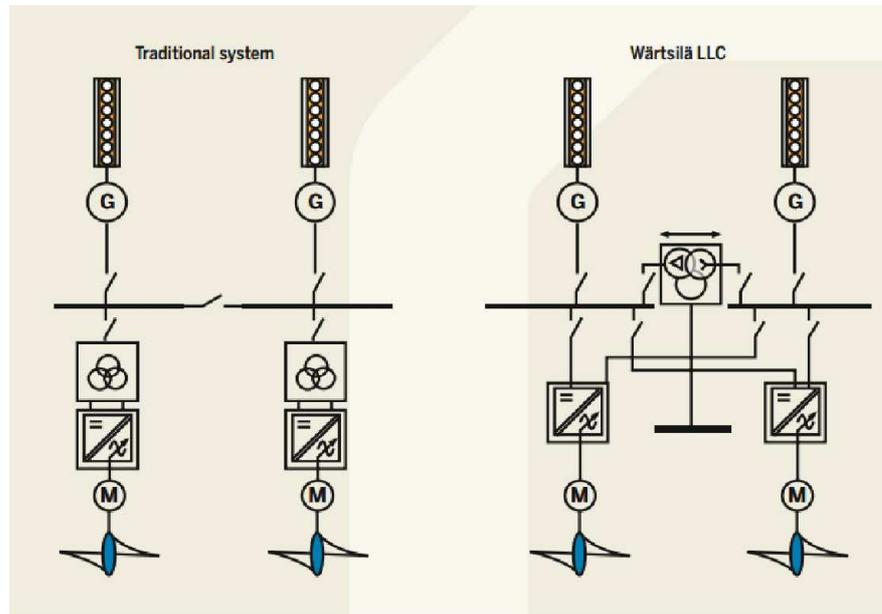
O navio com esses arranjos também ganha em flexibilidade e no gerenciamento de energia. A quantidade de MCPs (grupos geradores) em carga pode ser variada de acordo com a condição da embarcação e com a velocidade, de modo a manter os motores em funcionamento sempre na faixa de melhor desempenho e ótimo consumo de combustível.

### **3.4 Conceito de baixa perda da Wärtsilä**

O sistema de distribuição de energia eficiente é altamente redundante para aplicações na propulsão elétrica. O sistema está disponível tanto para baixa tensão como para aplicações de média tensão. Ele apresenta um design sem transformador, e seus benefícios incluem alta redundância, alta eficiência e excelente disponibilidade do sistema.

O Low Loss Concept (LLC), entendido como conceito de baixa perda abrange todas as aplicações de potência entre 5MW (Megawatt) e 45MW em ambas as versões de baixa tensão e média tensão. É eficaz também em navios com perfis operacionais que necessitam de velocidades variáveis, tais como PSV.

**Figura 4 - Sistema tradicional e Sistema de Propulsão Elétrica Wärtsilä**



Fonte: Wärtsilä.

Desenvolvimentos anteriores foram nas áreas de propulsão elétrica, conceitos híbridos e economia de combustível. O LLC é uma nova alternativa aos sistemas de distribuição de energia, compreendendo maior eficiência, menor peso e volume, e uma redundância do sistema. Ele representa uma nova abordagem no fornecimento de energia para os inversores de frequência para a propulsão elétrica.

O motivo básico do projeto é reduzir e eliminar a necessidade de alimentação (de pulso) de transformadores para os conversores de frequência, especialmente aqueles que alimentam a propulsão elétrica.

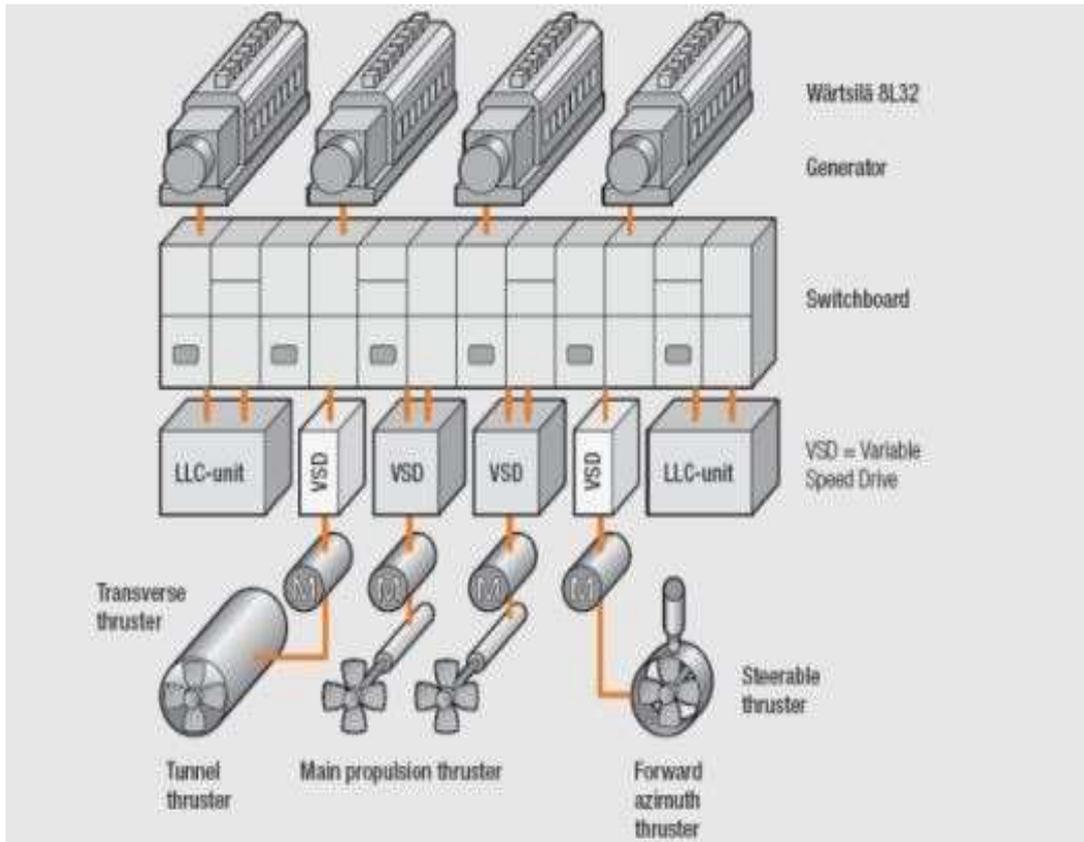
A solução LLC é baseada em um transformador comum de fase de 30 graus de deslocamento, que prevê o fornecimento de energia para a ponte de retificação de 12 pulsos, anulando correntes harmônicas causadas pelos conversores de frequência.

O sistema de distribuição de energia LLC foi patenteado internacionalmente pelo Grupo Wärtsilä.

O conceito LLC provou ser vantajoso em vários aspectos, citados a seguir:

- A configuração do transformador do sistema LLC resulta em uma maior eficiência do sistema de 2% a 3%. Este, por sua vez, implica em uma corrente de 10% menor fornecida através do quadro para o conversor de frequência.
- As perdas elétricas mais baixas no sistema resultarão em maior economia de combustível e uma menor necessidade de sistemas de máquinas auxiliares.
- A introdução do transformador LLC no sistema de distribuição elétrica reduz o nível de corrente de curto circuito global de 15% a 20%. Isto permite um design do sistema que compreende componentes de baixa tensão, e, subsequentemente, reduções significativas de peso e de volume em relação aos sistemas tradicionais, que incluem transformadores. Para certas aplicações, a redução do peso pode ser de 35% a 40% em comparação com modelos concorrentes.
- A distorção dita harmônica total da tensão, pois a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental, num sistema de LLC é ligeiramente melhor do que num sistema tradicional de 12 pulsos, e está concebido para ser sempre inferior a 5%.
- Restauração de energia instantânea após blackout é possível porque não há transformadores de propulsão para energizar.
- Mesmo nível de tensão em toda a instalação, mais flexibilidade de design, permitindo colocação centralizada de equipamentos sensíveis.
- Redução da exigência de combustível e redução do impacto ambiental.
- Aumento da estabilidade do sistema devido à impedância nos transformadores integrados.

**Figura 5 - Sistema de Propulsão Elétrica Wärtsilä**



Fonte: Wärtsilä.

Como pode ser observado na figura 5, os principais elementos da planta elétrica são os quatro geradores principais de 2400 kW (quilowatts), um painel principal de 690 V (Volts) e painéis de distribuição de 450 V e 230 V. Apresenta, no compartimento de comutação, duas unidades LLC, conversor de frequência e um par de motores de propulsão elétrica de 3500 kW alimentando dois propulsores do tipo Azipull. Apresenta ainda um bow thruster e um propulsor azimutal retrátil. As unidades LLC provêm, como foi mencionado, um sistema de 12 pulsos, baixa distorção harmônica baixo nível de curto circuito e alimentam o painel de 450 V.

## 4 SISTEMA DIESEL MECÂNICO

A propulsão Diesel Mecânica é o sistema propulsivo mais comumente utilizado em embarcações que necessitam de força bruta, de grande potência propulsiva e que produzam a tração estática (Bollard Pull) necessária para atividades como reboque de unidades flutuantes e/ou outras embarcações, além da fixação de âncoras em solo marinho, caso típico de AHTS's (Anchor Handling Tug Supply).

Esse sistema é composto motores diesel (MCP), acoplados a caixas redutoras, ligados aos propulsores através de linhas de eixo. Possuem ainda os geradores de eixo e geradores auxiliares que são responsáveis por suprir a demanda elétrica da embarcação.

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 *father-and-son*, no qual os motores possuem potências distintas. Em cada caixa redutora há geralmente uma tomada de força com um gerador de eixo. Devido a isso cada linha de eixo pode então ser servida por cada um dos motores, individualmente ou simultaneamente.

Abaixo pode ser verificada uma ilustração esquemática do Sistema Propulsivo Diesel Mecânica:

**Figura 6 - Propulsão Diesel Mecânica**



**Fonte: Wartsila.**

## 5 SISTEMA HÍBRIDO (DIESEL MECÂNICO + DIESEL ELÉTRICO)

Em navios de suporte a plataforma a capacidade total do motor deve ser dimensionada para atingir a velocidade de serviço solicitada pela embarcação, ou a capacidade de posicionamento dinâmico, nas piores situações meteorológicas possíveis. Como a maioria das novas embarcações *supply* são classificadas como DP 2, ou seja, com necessidade de redundância de seus equipamentos, a potência total instalada pode ser muito maior que a requerida para cargas médias.

Até pouco tempo atrás quase todos os navios do tipo AHTS eram construídos com sistema propulsivo do tipo Diesel Mecânico, devido ao foco primordial da embarcação que é o ballard pull, capacidade de tração estática, característica necessária para as atividades operacionais de reboque, que é a propulsão teórica atingida a uma velocidade de avanço nula ( $V_a = 0$ ) e uma rotação (RPM) plena do motor.

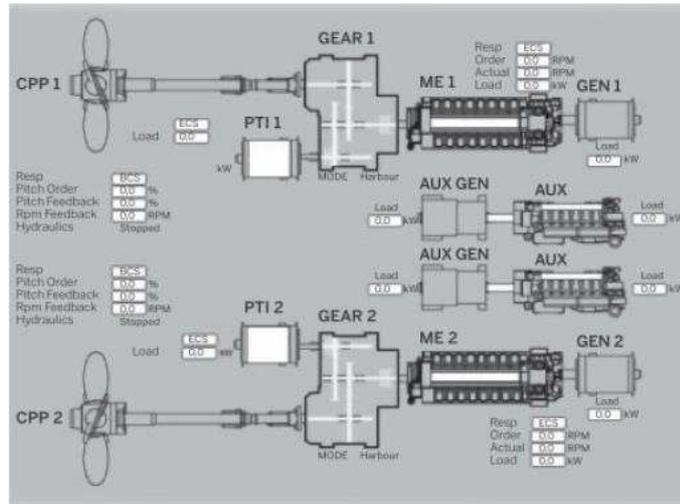
O sistema conhecido como Híbrido foi sendo estudado como uma possível solução para esses navios, que por possuírem um diversificado perfil operacional possuíam grande desperdício de energia. Um fator importante do estudo foi que os custos de construção adicionais eram mais baixos quando comparados com os benefícios gerados, como a economia de combustível inerente a esse sistema.

O sistema conhecido como Híbrido é caracterizado pela mescla dos dois primeiros sistemas propulsivos mencionados anteriormente. Foi uma forma escolhida por projetistas de aliar as melhores qualidades do diesel mecânico com o diesel elétrico, afim de com isso evitar o consumo excessivo de combustível em embarcações com perfis operacionais com atividades distintas, que exigem diferentes níveis de energia.

Esse sistema permite uma versatilidade na geração de energia, atendendo todas as faixas de consumo, dentro das faixas de operação dos Motores e Geradores do sistema. Trabalhar a maior parte do tempo dentro da faixa de operação de projeto dos motores e geradores resulta em maior eficiência energética e economia de combustível.

O sistema é composto pela parte mecânica, com motores diesel, caixas redutoras, geradores de eixo, pela parte elétrica, com motores elétricos, além de geradores auxiliares necessários pra suprir a demanda elétrica da embarcação com geradores de eixo.

**Figura 7 - Equipamentos Sistema Híbrido**

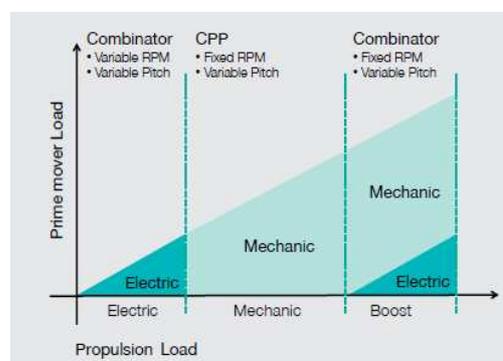


Fonte: Wartsila.

Em princípio, a embarcação com Sistema Propulsivo Híbrido pode ser operada de três maneiras:

- Propulsão elétrica pura para manobras de baixa velocidade, trânsito e DP;
- Propulsão mecânica pura para operações de reboque e trânsito de alta velocidade;
- Propulsão elétrica e mecânica híbrida, onde equipamentos elétricos podem ser utilizados como um “reforço” para o sistema de propulsão mecânica no intuito de atingir os requisitos de tração estática.

**Figura 8 - Tipos de Operação para Sistemas Híbridos**



Fonte: ABB.

Na propulsão elétrica pura para manobras de baixa velocidade, trânsito e DP, o motor de propulsão elétrica usa energia produzida pelos grupos geradores e gira o hélice por meio de um caixa de engrenagem. Normalmente, o motor principal fica desligado. Uma vantagem deste modo é a utilização eficiente de carga dos geradores auxiliares. Quando utiliza o motor elétrico de velocidade variável, o propulsor pode ser operado na curva de combinação com maior eficiência de propulsão, menor ruído e vibrações e menos manutenção do motor principal.

Na propulsão mecânica pura para operações de reboque e trânsito de alta velocidade, o modo intensificador PTI é selecionado para a velocidade máxima. Com o motor principal, o motor elétrico funciona como um motor auxiliar, que oferece suporte de potência para o hélice. Os geradores auxiliares fornecem energia tanto para a propulsão e os consumidores do navio. O modo intensificador PTI aumenta principalmente a flexibilidade do sistema de propulsão para cargas de pico.

Na propulsão elétrica e mecânica híbrida, onde equipamentos elétricos podem ser utilizados como um reforço para o sistema de propulsão mecânica no intuito de atingir os requisitos de tração estática, o que normalmente é bem superior às potências das outras condições operacionais.

## **5.1 O uso da propulsão híbrida**

Embarcações de apoio marítimo (PSV) ou embarcações de manuseio de âncoras (AHTS) necessitam de alta demanda de energia flexível e, por consequência, diferentes modos de operação e as velocidades de trânsito. O perfil de operação é frequentemente dividido em duas partes: uma com uma demanda de energia de propulsão de alta para o trânsito e outra com uma demanda de potência significativamente menor ao operar o navio em posicionamento dinâmico. A instalação típica pode ter dois propulsores principais e duas praças de máquinas separadas para garantir redundância do sistema e flexibilidade.

Os propulsores utilizados em PSVs diesel-elétrico são, geralmente, propulsores azimutais (ou thrusters azimutais). Estes propulsores têm um maior custo de aquisição e de manutenção. A solução proposta para se obter o melhor dos mundos foi um sistema diesel-elétrico-mecânico, ou DEM. Trata-se de um sistema que, quando em trânsito, opera uma propulsão mecânica acionada através de uma única linha de eixo e caixa redutora; no entanto, 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.

Apesar de parecer mais complexo, e de efetivamente possuir mais elementos que um sistema diesel-elétrico padrão, o sistema DEM é composto de elementos mais simples, de menor potência e de menor custo de aquisição que o conjunto de um sistema Diesel-Elétrico.

O sistema então funciona da seguinte forma: quando em navegação, os dois motores diesel acoplados à linha de eixo acionam a mesma, que transmite sua força a um único hélice de passo controlável e grande diâmetro. Tal e qual um sistema diesel-mecânico. Neste momento, a potência elétrica necessária para a carga de hotelaria e sistemas do navio pode tanto vir dos grupos-geradores auxiliares, como dos geradores de eixo. No entanto, quando da chegada na unidade que irá ser abastecida, os dois motores da 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 grupos 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 de eixo, quando a embarcação então parte para seu próximo destino com a propulsão diesel-mecânica em funcionamento.

O PSV DEM é visualmente bastante diferente dos demais devido ao seu grande propulsor central. Conforme pode ser demonstrado, um único propulsor com maior diâmetro e menor velocidade é mais eficiente do que dois propulsores de menor diâmetro e que possuam uma maior velocidade de rotação. Além disso, o casco passa a ter menos apêndices quando não apresenta os dois propulsores azimutais fixos presentes nos PSVs diesel-elétricos, e a redução dos apêndices é outra razão para melhor eficiência.

Finalmente, um único propulsor permite que as linhas de popa sejam otimizadas para um melhor fluxo. Dados operacionais obtidos junto à Wärtsilä demonstram que o consumo de combustível quando em navegação chega a ser 25% menor do que um PSV Diesel-Elétrico comum, enquanto que o consumo em DP é equivalente. No entanto, o ganho de 25% deve ser tomado como resultado de todas as modificações descritas, e não apenas do sistema em si. A adoção do sistema DEM permite que o projetista trabalhe o PSV de forma inédita.

No caso de um AHTS, a situação se inverte quanto à utilização de propulsão diesel-elétrica. O AHTS é uma embarcação de “força bruta”, necessitando de grande potência propulsiva de forma a gerar a tração estática (Bollard Pull) necessária ao reboque de estruturas e de outras embarcações, e para o travamento de âncoras no solo marinho. Portanto, o uso de propulsão totalmente diesel-elétrica acarretaria na necessidade de se instalar potência dez por cento maior que o efetivamente consumido pelos propulsores na condição de potência máxima.

Como AHTSs modernos geralmente possuem em torno de 14 a 20 MW de potência instalada, o uso deste tipo de propulsão – ainda que mais confiável e mais indicada para demandas variáveis – não é comum.

A propulsão para AHTS mais comum é a Diesel-Mecânica, com duas linhas de eixo, uma caixa redutora de dupla entrada e saída única e dois motores diesel por linha de eixo, em um arranjo chamado de father-and-son, no qual os motores possuem potências diferentes.

Em cada caixa redutora há geralmente uma tomada de força com um gerador de eixo. Cada linha de eixo pode então ser servida por cada um dos motores, individual ou simultaneamente. A embarcação possui então uma capacidade limitada de variar a potência propulsiva através da utilização do motor que mais se aproxime da demanda do momento.

Devido à grande variação de carregamento e demanda propulsiva, a totalidade dos AHTS modernos possui propulsores principais dotados de passo controlável. Geralmente possui velocidade constante, se valendo de um sistema hidráulico para variar o ângulo de ataque das pás, aumentando e diminuindo o passo do hélice, e assim controlar o empuxo. De forma análoga, a reversão do sentido do empuxo é feita sem variar a velocidade, bastando variar o passo negativamente. Ocorre que não se pode desprezar a absorção de potência pelo propulsor quando este se encontra na condição de “passo zero”. Apesar de não estar gerando empuxo, o propulsor está absorvendo em torno de 15 a 20% da potência máxima contínua do equipamento. Por este motivo, a maioria dos impelidores laterais atuais utilizados em operação de posicionamento dinâmico possui passo fixo e velocidade variável, geralmente através de um variador de frequência elétrica. O problema é que a propulsão principal do AHTS de propulsão mecânica possui motores diesel de média rotação, que por sua vez possuiriam teoricamente uma capacidade limitada de variação de velocidade. Teoricamente porque, como há um gerador de eixo acoplado ao sistema, este necessita funcionar em rotação constante para que a frequência elétrica seja mantida sob controle (geralmente 60 Hz, ou

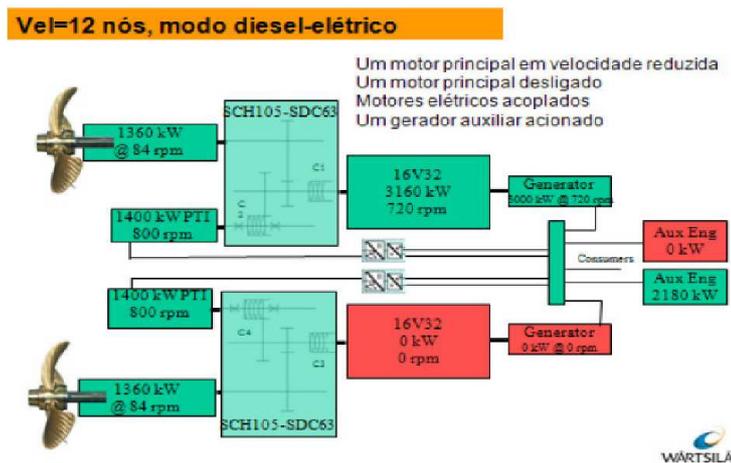
menos comum 50 Hz), o que obriga os motores diesel acoplados à caixa redutora a funcionarem sempre na sua velocidade máxima (equivalente a 100% da potência máxima contínua). Por exemplo, 19 MW de potência MCR acarretam uma perda mensurável em torno de 2,8 a 3,8 MW, que nada mais é do que potência dissipada.

O uso do sistema DEM permite uma abordagem interessante tanto à questão da operação em baixa potência, quanto ao problema da dissipação de potência na operação com passo zero.

O sistema é composto por duas linhas de eixo, sendo que cada uma delas possui um propulsor de passo controlável e uma caixa redutora. Há duas entradas para esta caixa redutora, uma com um motor diesel, e outra com um motor elétrico. Há ainda um gerador de eixo ligado diretamente ao motor principal.

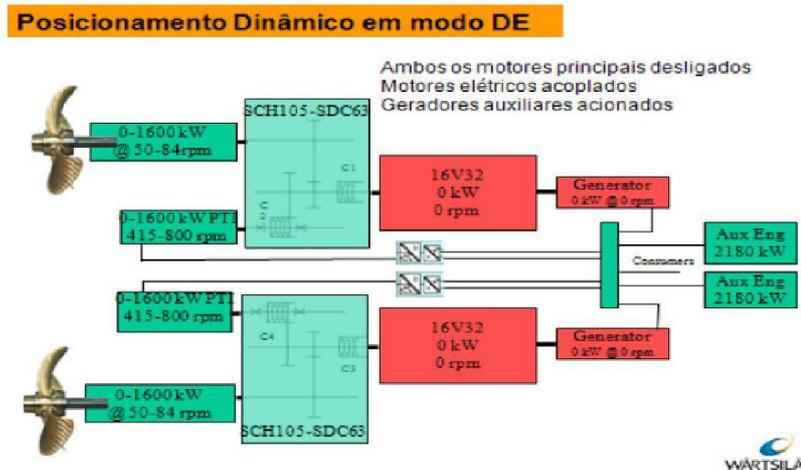
Há toda uma gama de modos operacionais, mas basicamente pode ser afirmado que o sistema DEM permite a utilização dos motores seja escalonada de forma a impedir o funcionamento em baixa carga. Da mesma forma, o problema da dissipação de potência quando em passo zero pode ser eliminado pelo acionamento dos motores elétricos através de um variador de frequência.

**Figura 9 - Modo de Navegação a 12 nós**



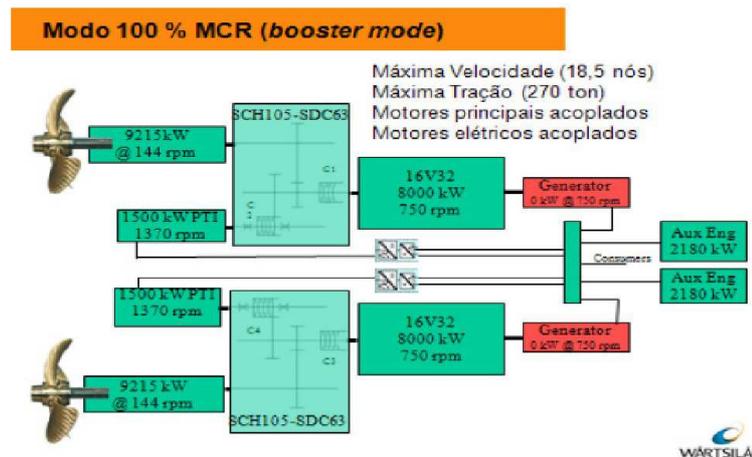
Fonte: cortesia Wärtsilä.

Figura 10 - Modo de Posicionamento Dinâmico Diesel-Elétrico



Fonte: cortesia Wärtsilä.

Figura 11 - Modo operacional 100%



Fonte: cortesia Wärtsilä.

Além disso, se houver necessidade de energia extra, por operação de força de tração (bollard pull), por exemplo, esta pode ser fornecida pelo motor elétrico, usando-o para PTI. O intensificador PTI também pode ser bem aplicado em operações de gelo. Durante a navegação a potência extra do motor pode ser usada para abastecer o PTO. Para navios com uma ampla gama de atividades, um sistema híbrido oferece significativamente mais baixo consumo de combustível e emissões em relação aos outros sistemas existentes. Os níveis de ruído e de vibração também são reduzidos, eliminando o risco de ressonância estrutural e proporcionando conforto e segurança à tripulação.

Para navios mercantes que operam em áreas muito diversas, como, por exemplo, embarcações que operam no transporte oceânico ou de cabotagem e necessitam navegar em rios ou lagoas, por esta diversidade presente no perfil operacional de tais embarcações, leva a crer que a propulsão DEM seja uma opção que valha a pena estudar a fundo.

Outra utilização seria a propulsão de navios aliviadores, os chamados shuttle tankers. Os aliviadores que possuem posicionamento dinâmico já possuem uma espécie de sistema híbrido, já que possuem um motor principal de dois tempos para a propulsão, e geradores extras com a função específica de fornecer energia para os thrusters utilizados na operação DP. No entanto, o sistema DEM pode ser avaliado como uma forma de se reduzir a potência total instalada a bordo, pois a potência para os thrusters seria fornecida pela propulsão principal, sem a necessidade de um sistema auxiliar.

## **5.2 Vantagens da propulsão híbrida**

Em termos de custos de instalação, soluções híbridas são mais econômicas do que sistemas puramente elétricos. Inicialmente, a solução híbrida ganha mais na eficiência energética nas operações de carga baixa, devido à utilização de propulsores de velocidade variável e ao motor diesel ideal para essas operações, e ao mesmo tempo reduz as perdas de transmissão relativas ao sistema elétrico. Por essas razões, novos projetos de navios AHTS têm sido baseados em tais soluções híbridas, especialmente aqueles com alta capacidade de tração estática (Bollard Pull).

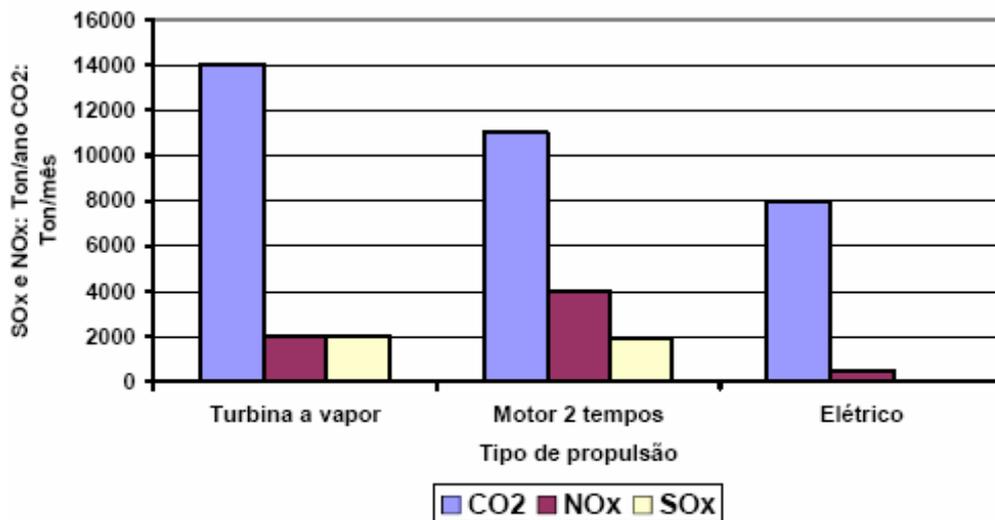
No entanto, o aumento da complexidade mecânica de tais sistemas híbridos faz com que a tripulação da embarcação deva ser mais ativa para selecionar manualmente o funcionamento ideal para os diferentes modos e condições verificando qual deve prevalecer.

Entre estas vantagens, podemos destacar os seguintes benefícios do sistema híbrido:

- Possui grandes variações dos modos de operação para uma demanda de energia flexível para operação em baixa velocidade até grande velocidade. Isto resulta numa planta de projeto de alta capacidade operacional com respostas rápidas do sistema e uma grande flexibilidade de planta;
- O hélice pode ser acionado pelo motor diesel e / ou pelo motor elétrico, o que resulta em um sistema de propulsão altamente redundante e confiável;

- Redução dos custos operacionais de plantas devido à possibilidade de operar os motores principais e geradores auxiliares em uma gama onde a quantidade necessária de energia é fornecida por uma combinação de motores que funcionam próximo ou em carga ideal com o mínimo consumo de óleo combustível específico;
- Como resultado da elevada eficiência da planta ao longo de um vasto leque de modos de operação, não é só o menor consumo de óleo combustível, mas também a inexistência de emissões de NOx oriundas da compressão do ar nos motores do ciclo diesel e ainda menores quantidades das emissões oriundas da queima do combustível fóssil que produz SOx e CO2. Conforme mostrado na figura 12.

**Figura 12 - Redução da Emissão de Poluentes**



Arquivo: Arquivo Pessoal.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao comparar os três tipos de sistemas propulsivos, (Diesel Elétrico, Diesel Mecânico e Híbrido) pode-se notar que para embarcações que passam a maior parte do tempo em regime de posicionamento dinâmico a melhor configuração para seu sistema propulsivo é Diesel Elétrico, pois nessa configuração o passo do propulsor é fixo não havendo, consumo de combustível quando o hélice está em “passo zero”, ou seja, sem produzir empuxo.

Para que um estudo completo fosse feito, seria necessário que cálculos numéricos fossem comparados com os resultados experimentais de navios reais que operassem com o mesmo perfil operacional e mesma configuração de sistema propulsivo. Com isso, poderia comprovar a eficiência do método utilizado para encontrar os valores de consumo e custo de combustível e conseqüentemente de custo operacional para essas embarcações.

Portanto conclui-se que um estudo preliminar de escolha de sistema propulsivo levando-se em consideração a missão da embarcação, área de atuação e perfil de operacional da mesma se mostra de grande utilidade na diminuição de custos operacionais, tornando-a mais lucrativa e competitiva frente ao mercado de afretamento.

O sistema Diesel-Elétrico-Mecânico (híbrido) não é um sistema de propulsão que veio para substituir todos os outros. Não se trata de uma panaceia, capaz de resolver todos os problemas de eficiência ou economia de combustível. Como toda opção que precisa ser feita, a escolha de um sistema DEM acarretará benefícios que devem ser sopesados frente a uma maior complexidade de instalação, cabendo, como sempre, ao projetista da embarcação a avaliação do que seria melhor para o caso concreto, ouvidos o armador e o estaleiro construtor. No entanto, em tempos de alto custo de combustível e de aumento de custos operacionais diretos, a possibilidade de economia e melhor adequação operacional que o conceito de sistema Diesel-Elétrico-Mecânico nos apresenta indica que há um cenário favorável ao estudo de mais aplicações deste tipo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Renata Nunes. **Propulsão elétrica de navios**. 2007. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro.

BARCELLOS, Renato. **Sistema híbrido de propulsão como uma alternativa viável aos sistemas diesel-elétrico e diesel mecânico**. Disponível em:

<[http://www.ipen.org.br/downloads/sobena/maquinas\\_maritimas/TF120.pdf](http://www.ipen.org.br/downloads/sobena/maquinas_maritimas/TF120.pdf)>. Acesso em: 22 de set. 2014.

CARLTON, John. Marine propellers and propulsion. Disponível em:

<[http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/Marine%20Propellers%20and%20propulsion%20\(CARLTON\)%20.pdf](http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/Marine%20Propellers%20and%20propulsion%20(CARLTON)%20.pdf)>. Acesso em: 22 de set. 2014.

FERNANDES, Gisele Mattos. **Comparação de eficiência entre propulsão azipod e propulsão diesel em navios**. 2010. Monografia. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha – CIAGA/Curso de Formação de Oficiais da Marinha Mercante – EFOMM. Rio de Janeiro.

MELO, Alex Eustáquio de. **Análise da propulsão diesel elétrica em embarcações de apoio marítimo**. 2012. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha – CIAGA/Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas– APMA. Rio de Janeiro.