

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

WELLINGTON SIMÕES PACÍFICO

PROPULSÃO ELÉTRICA A FORMA DE PROPULSÃO DO FUTURO

RIO DE JANEIRO

2014

WELLINGTON SIMÕES PACÍFICO

PROPULSÃO ELÉTRICA A FORMA DE PROPULSÃO DO FUTURO

Monografia apresentada 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: Msc. Luiz Otavio Ribeiro Carneiro.

RIO DE JANEIRO

2014

WELLINGTON SIMÕES PACÍFICO

PROPULSÃO ELÉTRICA A FORMA DE PROPULSÃO DO FUTURO

Monografia apresentada 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 este trabalho ao meu filho Enzo de Castro Pacífico, motivo
de minha alegria e amor.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a DEUS, que tornou tudo possível, agradecer aos meus pais Paulo Roberto Pacífico e Kelita Simões Pacífico que sempre estiveram me apoiando e a minha esposa Rosana de Castro Chaves Pacífico, pelo amor e companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Orientador Msc Luis Otavio Ribeiro Carneiro pela sua disponibilidade.

Obrigado por tudo.

“Aquele que não luta pelo futuro que quer, deve aceitar o futuro que vier”.

(Anônimo)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a propulsão Diesel elétrica e seus tipos de propulsores, que estão proporcionando um acentuado desenvolvimento na propulsão elétrica de navios, tais como redução do consumo de combustível, flexibilidade do projeto, motor de indução trifásico, redução dos custos de manutenção e redução da emissão de poluentes.

Palavras-chave: Propulsão elétrica. Geradores. Motores elétricos. Propulsão Mecânica. Economia de combustível.

ABSTRACT

This paper presents a study on the diesel electric propulsion thrusters and their types, which are providing a marked development in electric ship propulsion, such as reduced fuel consumption, design flexibility, three-phase induction motor, reduction of maintenance costs and reducing emissions of pollutants.

Keywords: Electric propulsion. Generators. Electric motors. Mechanical drives. Fuel economy .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistema de Acionamento elétrico Integrado	10
Figura 2 -	Contratorpedeiro tipo 42	12
Figura 3 -	Navio Transatlântico Queen Mary II	13
Figura 4 -	Exemplo de embarcação de apoio marítimo com propulsão elétrica	14
Figura 5 -	USS JUPITER	15
Figura 6 -	USS LANGLEY	15
Figura 7 -	USS NEW MEXICO	16
Figura 8 -	O motor de Indução avançado (Multifásico com 15 fases)	18
Figura 9 -	Protótipo do motor homopolar com material supercondutor em CC	18
Figura 10 -	Motor síncrono com material supercondutor em alta temperatura	19
Figura 11 -	Motor HTSAC (5 MW - 230 rpm)	19
Figura 12 -	Motor de Indução Avançado	20
Figura 13 -	Motor de Indução Avançado (AM) comparado a uma pessoa	20
Figura 14 -	Tecnologias para a propulsão elétrica em testes no ESTD	23
Figura 15 -	Diagrama elétrico de um sistema de propulsão elétrica	23
Figura 16 -	Diagrama de blocos de um sistema de propulsão elétrica	25
Figura 17 -	Propulsor de Passo Controlável	27
Figura 18 -	Sistema de Propulsores sem Leme	28
Figura 19 -	Propulsor de Hélices Duplas	29
Figura 20 -	STP TWIN PROPELLER	30
Figura 21 -	Propulsor de Hélices Duplas	31
Figura 22 -	Z-Drive	32
Figura 23 -	Esquema de um L-Drive	32
Figura 24 -	Consumo de combustível	33
Figura 25 -	Diagrama de combustível por potencia em relação a um motor Diesel	34
Figura 26 -	Distribuição dos equipamentos na praça de máquinas	35
Figura 27 -	Arquitetura do sistema de Controle com Redundância	39
Figura 28 -	M/V DEEP STIM BRAZIL 2	41
Figura 29 -	Conjunto do motor elétrico e Caixa Redutora	42
Figura 30 -	Dados do Motor Elétrico	43
Figura 31 -	Painel de Controle	44
Figura 32 -	Painel de controle com os geradores	44
Figura 33 -	Stern Thruster	45
Figura 34 -	Geradores na praça de máquinas	46
Figura 35 -	Vista frontal do gerador	47
Figura 36 -	Configuração do sistema elétrico do Contratorpedeiro "Type 45"	47
Figura 37 -	M/V DEEP STIM BRAZIL 2 no fundeio na baía da Guanabara	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	A UTILIZAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA	12
2.1	Um breve histórico sobre propulsão elétrica	15
2.2	A Guerra	16
3	MOTORES ELÉTRICOS	18
3.1	Motores de indução	18
3.2	Motores síncronos de imãs permanentes	18
3.3	Motores síncronos com materiais supercondutores em alta temperatura	19
3.4	Motores homopolares em corrente contínua (CC)	19
3.5	Motor de Indução Avançado (AIM)	20
3.6	Motor de Indução Avançado (AIM) comparado a uma pessoa	20
4	PROPULSÃO MECÂNICA TRADICIONAL E ELÉTRICA	22
4.1	A propulsão mecânica	22
4.2	A propulsão elétrica	22
5	PROPULSORES ESPECIAIS ELÉTRICOS	27
5.1	Passo controlável	27
5.2	Azimutais POD e AZIPOD	27
5.3	Helices Duplas	29
5.4	STP Twin Propeller	29
5.5	CRP Helices Contra rotativas	30
5.6	Z-Drive	31
5.7	L-Drive	32
6	PRINCIPAIS VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA	33
6.1	Redução do Consumo de Combustível	33
6.2	Redução da Tripulação	34
6.3	Flexibilidade do Projeto	35
6.4	Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio	36
6.5	Aumento da Vida Útil do Navio	36
6.6	Redução dos Custos de Manutenção	37
6.7	Redução da Emissão de Poluentes	37
7	APRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA ATUAL	41
7.1	Motor Vessel DEEP STIM BRAZIL 2	41
7.2	O Motor elétrico de Propulsão Principal	43
7.3	Painel de Controle	44
7.4	Thrusters	45
7.5	Geradores	46
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERENCIAS BIOGRÁFICAS	50
	GLOSSÁRIO	51

1 INTRODUÇÃO

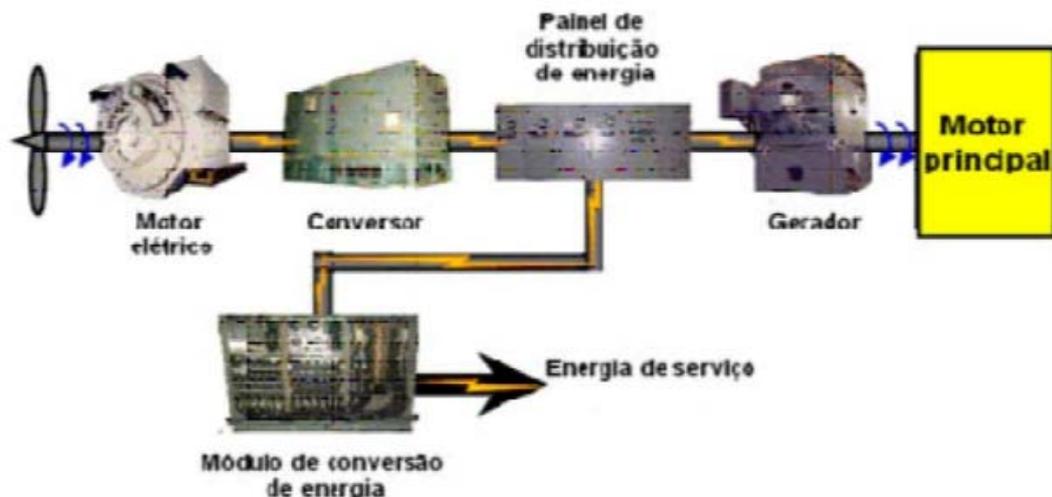
O conceito de propulsão elétrica não é novo, a ideia originou-se a mais de 100 anos. No entanto, com o desenvolvimento da eletrônica de potência nas décadas de 80 e 90, possibilitou-se o melhor controle de motores elétricos com velocidade variável em uma grande faixa de potência, além de ser um sistema compacto, confiável e competitivo.

A utilização da Propulsão Elétrica vem se difundindo fortemente nos diversos setores da indústria marítima, e está se estabelecendo como uma das melhores e mais atrativas opções para promover a redução dos custos operacionais, tão desejada neste ambiente altamente competitivo.

Segundo as informações de Whitman E. C (2001, p.18), o conceito de Propulsão Elétrica Integrada, utilizando o acionamento elétrico, é a tecnologia mais promissora nos desenvolvimentos da engenharia naval atual, desde o advento dos reatores nucleares e das turbinas a gás.

Entende-se por Propulsão Elétrica 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.

Figura 1 - Sistema de Acionamento elétrico Integrado



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

A principal característica deste sistema é o controle da propulsão da embarcação pelo motor elétrico.

No Sistema de Propulsão Elétrica ao invés de dois sistemas de potência separados, cada um com sua limitação de carga específica, passa-se a dispor de uma capacidade de geração única que pode ser distribuída com maior flexibilidade entre as diversas áreas e sistemas de bordo, de acordo com as alterações de demanda.

Deverá ser projetado de forma a conciliar diversos requisitos como: grande flexibilidade operativa e robustez. Aliado a estes fatores o aspecto econômico envolvendo os custos de projeto, construção, manutenção e operativos, ao longo da vida útil do meio, são extremamente importantes e decisivos, pois devem ser os menores possíveis.

Um dos aspectos mais significativos no projeto de um novo navio militar é o método de propulsão que será empregado. A propulsão convencional mecânica está perdendo mercado em virtude da história de sucessos, ao longo dos últimos 30 anos, da aplicação da Propulsão Elétrica.

2 A UTILIZAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA

A propulsão realizada pelo acionamento elétrico já é padrão para navios comerciais de cruzeiro e, nas Marinhas dos Estados Unidos e do Reino Unido.

Figura 2 - Contratorpedeiro tipo 42



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

O sucesso obtido recentemente nas tentativas de aumentar a densidade de potência e reduzir o volume e o peso dos motores elétricos permitirá, em curto prazo, que navios de pequeno porte, em especial navios militares, possam se beneficiar das vantagens associadas à Propulsão Elétrica. Os benefícios alcançados com esta forma de acionamento farão com que os mares sejam definitivamente conquistados pela energia elétrica.

Passada a fase de desenvolvimento e diluição de riscos, a Propulsão Elétrica estará pronta para embarcar nos navios militares do novo milênio. Sua utilização reduzirá ou eliminará completamente as engrenagens redutoras, permitirá grande opere freqüentemente na faixa de ótimo desempenho, reduzirá o consumo de combustível, a manutenção e a emissão de poluentes.

Inicialmente adotada em projetos de quebra-gelos e navios especializados, a Propulsão Elétrica tem conquistado novos mercados. Ela já é padrão nos mais modernos navios comerciais de cruzeiro, como o “Transatlântico Queen Mary II.”

Figura 3 - Navio Transatlântico Queen Mary II



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Por outro lado, diversas Marinhas do mundo também se voltam para a Propulsão Elétrica na busca de alternativas de projeto que tornem seus navios mais preparados para as atividades militares, adaptando-se à nova realidade, quase unânime em nível global, de restrição orçamentária na área de defesa. A Marinha Americana (USN) e a Inglesa (RN) saíram na frente e investem elevados recursos na pesquisa e construção de novos navios de superfície com propulsão efetuada pelo acionamento elétrico.

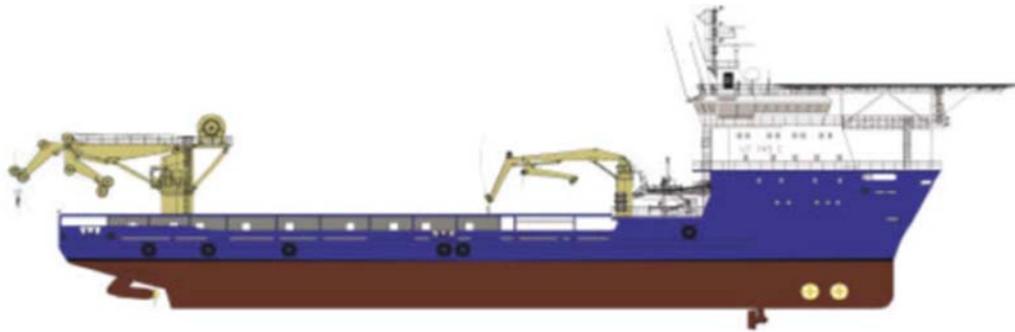
A energia elétrica possui como característica de maior importância a versatilidade de poder ser convertida para corrente contínua (CC) ou alternada (CA), inclusive com diferentes níveis de tensão e de frequência. Esta capacidade de conversão, propiciada pela Eletrônica de Potência, é fundamental para o crescimento das já numerosas aplicações da eletricidade em sistemas e equipamentos a bordo de navios.

Outro fato que colabora para a intensiva necessidade da eletricidade disponível a bordo é a crescente demanda por energia elétrica, que nos dias atuais, dependendo da finalidade do meio naval, pode alcançar valores da ordem de 100 MW.

No futuro, graças aos avanços na área de Eletrônica de Potência, os sistemas elétricos dos navios serão totalmente diferentes daqueles existentes nos dias atuais.

Pode-se concluir que, devido aos contínuos sucessos obtidos, os sistemas elétricos terão cada vez mais, um papel de destaque nos futuros sistemas navais dos novos meios de superfície que irão compor a Força Naval Elétrica.

Figura 4 - Exemplo de embarcação de apoio marítimo com propulsão elétrica



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Diesel-elétrico é um sistema de transmissão de potência usado em grande escala no transporte marítimo. Neste sistema, um motor diesel transmite energia a um gerador ou alternador que por sua vez transmite essa energia ao eixo por meio de um motor elétrico.

Unidades diesel-elétricas também são empregadas em submarinos e navios de superfície, bem como em veículos terrestres pesados, tais como grandes caminhões fora-de-estrada de mineradoras. Em alguns casos, a energia elétrica pode ser armazenada em baterias recarregáveis, caracterizando dessa maneira uma certa classe de veículo elétrico híbrido.

A propulsão de navios e submarinos utilizando motores elétricos não é uma inovação tecnológica recente. A primeira aplicação de propulsão elétrica no setor naval ocorreu no século XIX, com a construção e operação de uma pequena lancha movida a baterias para o transporte de passageiros na Rússia.

2.1 Um breve histórico sobre propulsão elétrica

A utilização da propulsão elétrica também não é um conceito novo para a Marinha Americana (USN). Em 1913, a bordo do navio carvoeiro USS “Jupiter, foi implementada uma instalação experimental com 4.1 MW de potência instalada por eixo.

Figura 5 - USS JUPITER



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

O sistema de propulsão do USS “Jupiter” consistia de um turbo gerador em corrente alternada (CA) que alimentava dois motores de indução com rotor bobinado. O experimento obteve sucesso e o navio foi convertido em 1922, no primeiro navio- aeródromo da Marinha Americana, chamado USS “Langley”. O navio apresentou uma elevada robustez e permaneceu em plena capacidade operativa até 1942, quando foi afundado em combate.

Figura 6 - USS LANGLEY



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

2.2 A Guerra

O sucesso obtido na utilização da propulsão elétrica e a percepção dos seus benefícios estimularam o grande esforço empregado para a construção de 50 navios com este tipo de propulsão, durante o período entre a Primeira e a Segunda Guerra Mundiais. Entre estes navios estava o USS “New Mexico” com 30 MW de potência instalada, o segundo e o terceiro navios- aeródromo da Marinha Americana, USS “Lexington” e USS “Saratoga”, com potência instalada de 135 MW.

Figura 7 - USS NEW MEXICO



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Durante a Segunda Guerra Mundial, mais de 160 navios de escolta dotados de propulsão elétrica foram construídos para a Marinha Americana, utilizando turbo ou diesel geradores na faixa de 4,5 a 9,0 MW. Aproximadamente 500 navios de pequeno porte foram também equipados com sistemas de propulsão elétrica em corrente contínua com potência instalada na faixa de 225 kW a 15 MW. É interessante destacar que a falta de capacitação técnica para a produção em larga escala de engrenagens foi um dos motivos que também contribuíram para o significativo aumento do número de navios com propulsão elétrica durante o período bélico.

Entretanto, por volta de 1940, os desenvolvimentos na tecnologia dos sistemas de engrenagens de dupla redução, para aplicações no setor naval e militar, passaram a apresentar preços competitivos nos Estados Unidos. Aliado a este fator, e também a algumas desvantagens da propulsão elétrica existentes naquela época,

como maior peso, maior volume e menor eficiência energética, a expansão do uso da propulsão elétrica em larga escala foi drasticamente inibida, em detrimento da propulsão mecânica convencional.

A mudança da preferência do tipo de propulsão a ser empregada em larga escala também foi influenciada pelas melhorias tecnológicas obtidas no setor de metalurgia e na manufatura de engrenagens redutoras com peso e volume menores e melhores resultados no desempenho acústico dos equipamentos.

Este panorama da situação persistiu até o início do século XXI, quando a capacidade de transmissão mecânica de energia atingiu seu limite tecnológico e de viabilidade econômica.

Durante as décadas de 1980 a 1990, os avanços tecnológicos, na área de Eletrônica de Potência, tornaram a transmissão elétrica de energia mais eficiente e compacta, e desta forma, possibilitou o retorno do emprego da propulsão elétrica em diversas classes de navios, como quebra-gelos, oceanográficos, tanque e numerosos transatlânticos.

Atualmente, as pesquisas para a definição das melhores alternativas de tecnologia envolvendo propulsão elétrica estão em plena evolução. As pesquisas relativas aos motores de propulsão, para aplicação naval e militar, apresentam os seguintes requisitos essenciais: formato compacto, peso e volume reduzido, elevadas faixas de potência gerada para valores específicos de torque, resistência ao choque, e baixos valores de assinatura acústica e eletromagnética.

A Marinha Americana investe elevados recursos financeiros em quatro frentes de pesquisa em motores para a propulsão:

3 MOTORES ELÉTRICOS

3.1 Motores de indução

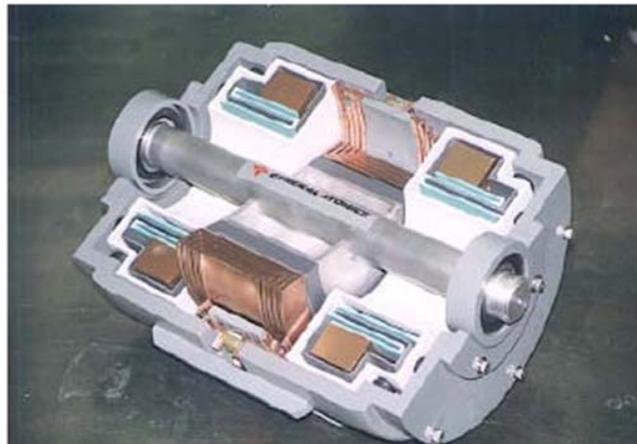
Figura 8 - O motor de Indução avançado (Multifásico com 15 fases)



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

3.2 Motores síncronos de ímãs permanentes

Figura 9 - Protótipo do motor homopolar com material supercondutor em CC



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

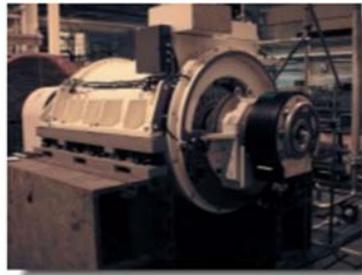
3.3 Motores síncronos com materiais supercondutores em alta temperatura

Figura 10 - Motor síncrono com material supercondutor em alta temperatura



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Figura 11 - Motor HTSAC (5 MW - 230 rpm)



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

3.4 Motores homopolares em corrente contínua (CC)

O motor de indução multifásico (15 fases) oferece um design robusto e elevada densidade de potência elétrica. Este tipo de motor já foi escolhido para ser utilizado pela Marinha Inglesa, em seu navio de escolta (Contratorpedeiro “Type 45”). Conforme as informações de Clive Lewis no documento da referência, o Motor de Indução Avançado (AIM) encontra-se em fase final de comissionamento, e com resultados bastante promissores.

3.5 Motor de indução avançado (AIM)

Figura 12 - Motor de Indução Avançado



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

3.6 Motor de indução avançado (AIM) comparado a uma pessoa

Figura 13 - Motor de Indução Avançado (AIM) comparado a uma pessoa



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Os motores síncronos de ímãs permanentes, quando comparados com os motores de indução de mesmo tamanho, possuem maior densidade de potência elétrica e menor nível de ruído acústico. Este tipo de motor já foi escolhido para ser empregado nos novos navios combatentes multi-missão de superfície da Marinha Americana.

Os motores síncronos com materiais supercondutores em alta temperatura (HTSAC) apresentam significantes reduções no volume e peso, quando comparados com os motores elétricos convencionais, devido às suas bobinas supercondutoras com elevados níveis de densidade de corrente elétrica (Fig. 10 e Fig. 11). Este tipo

de motor apresenta a densidade de potência elétrica cerca de cinco vezes maior do que aquela encontrada em motores convencionais de mesmas dimensões físicas. Outra característica deste motor é o reduzido nível de ruído e a elevada eficiência (devido à redução das perdas elétricas no rotor), particularmente em situações com velocidade reduzida e demandas parciais de cargas. Conforme as informações de Bobby A. Bassham, as pesquisas com este tipo de motor estão sendo desenvolvidas pela empresa “American Superconductor Corporation” - (AMSC).

Os motores homopolares com materiais supercondutores em corrente contínua (CC) (SDCHM) também utilizam bobinas confeccionadas com materiais supercondutores em seu rotor e apresentam peso e volume reduzidos e estratégias de controle menos complexas (Fig. 9). Conforme as informações de Bobby A. Bassham, as pesquisas com este tipo de motor estão sendo desenvolvidas pela empresa “General Atomics Corporation”.

4 PROPULSÃO MECÂNICA TRADICIONAL E ELÉTRICA

4.1 A propulsão mecânica

Nas embarcações dotadas de Propulsão Mecânica tradicional, a rotação do motor diesel é quem 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.

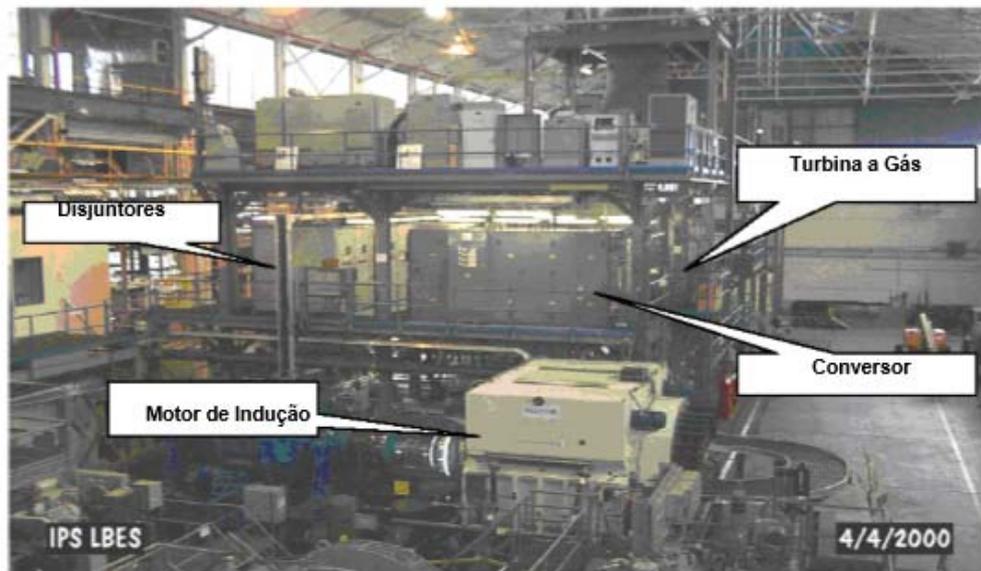
No sistema de propulsão mecânico convencional o dispositivo de acionamento principal a ser empregado, que pode ser um motor diesel, é acoplado diretamente ao eixo propulsor da embarcação de apoio através da engrenagem redutora. Neste tipo de configuração do sistema de propulsão é necessário um diesel gerador auxiliar, instalado em local separado do sistema de propulsão, que fornecerá a potência elétrica para o atendimento da carga para acomodações, dos sistemas operacionais e demais auxiliares de bordo para McCoy (2002, p. 22-36).

4.2 A propulsão elétrica

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 relativamente alta velocidade e baixo torque do dispositivo de acionamento principal para a baixa velocidade e elevado torque requerido para girar os propulsores.

No sistema de Propulsão Elétrico a eficiência da transmissão não é tão sensível à variação da velocidade do eixo propulsor, como ocorre com a transmissão mecânica convencional. Portanto, nos períodos em que a embarcação opera com velocidade mais baixa a eficiência da transmissão elétrica é maior do que a da transmissão mecânica.

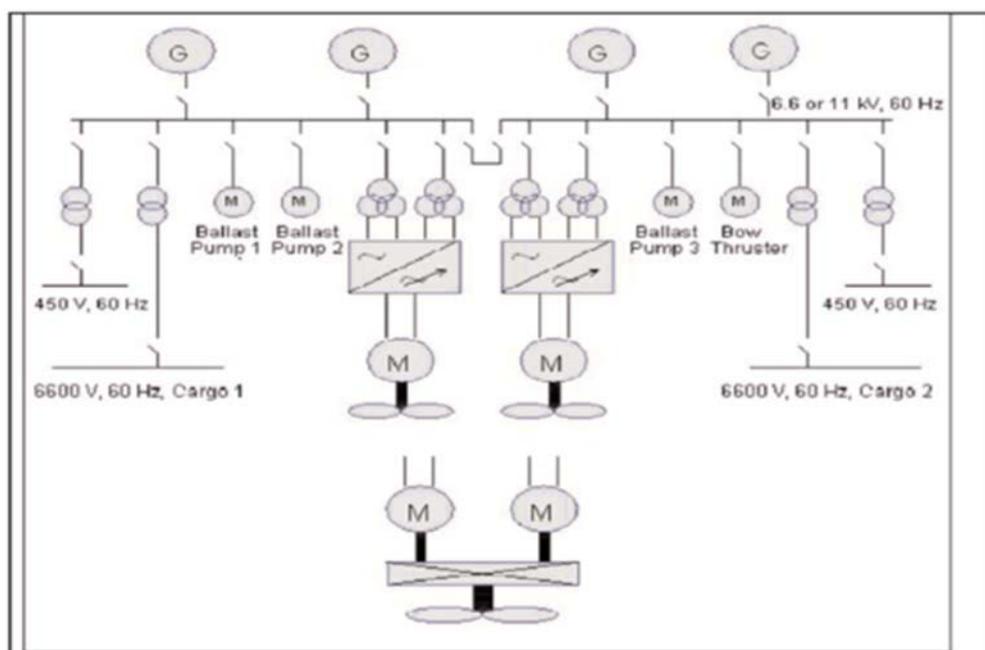
Figura 14 - Tecnologias para a propulsão elétrica em testes no ESTD



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

E considerando que, as embarcações de apoio marítimo operam a maior parte do tempo em atividades com baixas velocidades, como em operações em posicionamento dinâmico (DP), em prontidão e atracado tem-se aí o grande diferencial positivo para justificar o emprego da Propulsão Elétrica.

Figura 15 - Diagrama elétrico de um sistema de propulsão elétrica



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Em qualquer sistema de alimentação isolado, a quantidade de energia gerada deve ser igual à energia consumida, incluindo as perdas. Para um sistema elétrico que consiste de uma planta de geração de energia elétrica, um sistema de distribuição, incluindo todas as perdas energéticas, o fluxo de potência pode ser ilustrado abaixo:

Para cada um dos componentes, a eficiência elétrica pode ser calculada, e os valores típicos de potência (nominal) completo são para: gerador: $\eta = 0,95$ a $0,97$, barramento principal: $\eta = 0,999$; transformador: $\eta = 0,99$ a $0,995$; conversor de frequência: $\eta = 0,98$ a $0,99$; e motor elétrico: $\eta = 0,95$ a $0,97$.

Assim, a eficiência de um sistema elétrico diesel, a partir do eixo do motor diesel, a elétrica do eixo do motor de propulsão, é normalmente entre $0,88$ e $0,92$ em plena carga. A eficiência depende da carga do sistema.

Portanto entre o eixo do motor diesel e o eixo do motor elétrica, de propulsão de um sistema de propulsão diesel elétrica, as perdas são fixas e por volta de 10% .

O fator de eficiência energética do sistema vai depender dinamicamente da variação da carga na propulsão. nota-se que a eficiência ótima de um motor diesel fica em torno de 80% de carga, com isto exposto, uma planta de propulsão em que mantenham os motores diesel constantemente nesta faixa ótima de trabalho, teria a eficiência aumentada.

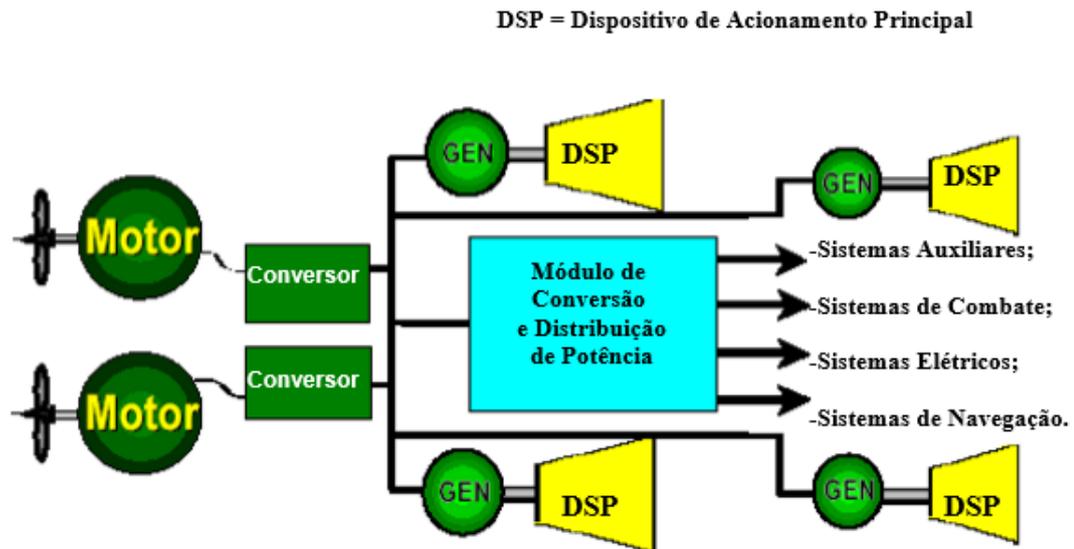
Segundo as informações de Whitman E. C., o conceito de Propulsão Elétrica Integrada, utilizando o acionamento elétrico, é a tecnologia mais promissora nos desenvolvimentos da engenharia naval atual, desde o advento dos reatores nucleares e das turbinas a gás há 50 anos atrás.

Entende-se por Propulsão Elétrica 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.

No Sistema de Propulsão Elétrica ao invés de dois sistemas de potência separados, cada um com sua limitação de carga específica, passa-se a dispor de uma capacidade de geração única que pode ser distribuída com maior flexibilidade entre as diversas áreas e sistemas de bordo de acordo com as alterações de demanda.

Portanto, o conceito de Propulsão Elétrica visa basicamente à integração entre o sistema de potência da propulsão do navio com os sistemas auxiliares. E com a eletrificação dos sistemas auxiliares, abre-se a possibilidade de utilização de estruturas modulares com maior flexibilidade para expansões futuras.

Figura 16 - Diagrama de blocos de um sistema de propulsão elétrica



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Nos navios dotados de Propulsão Mecânica tradicional, a rotação do motor diesel é quem 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 mecânico convencional o dispositivo de acionamento principal a ser empregado, que pode ser uma turbina a vapor, um motor diesel, ou uma turbina a gás, é acoplado diretamente ao eixo propulsor do navio através da engrenagem redutora.

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 da carga hotel, do sistema de combate e demais auxiliares de bordo.

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 relativamente alta velocidade e baixo torque do dispositivo de acionamento principal para a baixa velocidade e elevado torque requerido para girar os propulsores.

No sistema de Propulsão Elétrico a eficiência da transmissão não é tão sensível à variação da velocidade do eixo propulsor, como ocorre com a transmissão mecânica convencional. Portanto, nos períodos em que o navio opera com velocidade mais baixa a eficiência da transmissão elétrica é maior do que a da transmissão mecânica. E considerando que, o navio militar opera aproximadamente 85% do tempo em atividades com baixas velocidades de navegação, tem-se aí o grande diferencial positivo para justificar o emprego da Propulsão Elétrica.

5 PROPULSORES ESPECIAIS ELÉTRICOS

5.1 Passo controlável

Este sistema incorpora uma tecnologia de resposta rápida com nível de ruídos e vibrações perto do limite de zero. Pode ser utilizado em muitos tipos de embarcação. Tem ao seu favor o fato de serem extremamente robustos e preparados para operarem em condições adversas de mar com baixo custo de manutenção.

O passo é controlado por um mecanismo hidráulico dentro do cubo e não tem necessidade de caixas inversoras. O impulso é controlado pelo passo do hélice, fazendo com que a embarcação possa navegar com sua velocidade mais eficiente.

Figura 17 - Propulsor de Passo Controlável



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

5.2 Azimutais POD e AZIPOD

Propulsor azimutal é um sistema de propulsão capaz de girar 360° dispensando o uso de leme e dando maior manobrabilidade a embarcação, dessa forma bastante indicado para embarcações de apoio marítimo. Além dessa principal vantagem, a propulsão azimutal também é mais eficiente que a convencional graças

ao uso de motores elétricos, ela faz melhor uso das dimensões da embarcação conferindo mais espaço para outras instalações, os custos de manutenção também são menores. Os propulsores azimutais podem apresentar transmissão mecânica ou elétrica, sendo que na segunda o motor fica localizado fora do casco da embarcação eliminando a necessidade de caixa de transmissão, já nos modelos tradicionais de transmissão mecânica onde o motor fica localizado no interior da embarcação o torque chega até a embarcação graças ao sistema de transmissão que pode ser do tipo Z-drive ou L-drive.

De acordo com Harrington (1970) o conjunto gerador-motor elétrico pode ser tratado como um sistema de transmissão elétrico. O primeiro projeto de Pod propulsor foi concebido em 1955, quando Pleuger e Busmann projetaram o sistema e o patentearam nos Estados Unidos (PÊGO et al., 2005). Em 1990, a ABB lançou no mercado o mesmo conceito de propulsão aprimorado para aplicações comerciais denominado Azipod. Basicamente, o sistema consiste de um motor elétrico, alojado dentro de um Pod adequado para fornecer melhor escoamento do fluido, conectado a um hélice. Este conjunto é instalado na parte externa do casco e possui capacidade de girar 360° em torno do seu próprio eixo.

Figura 18 - Sistema de Propulsores sem Leme



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

Embora existam outras empresas que fabricam propulsores em Pod, durante a investigação notou-se que apenas os sistemas fabricados pela ABB seriam de

interesse para embarcações dadas as suas configurações. Este sistema pode ser Os dois modelos estudados são o STP (Twin Propellers) e o CRP (Hélices contra rotativas).

5.3 Hélices duplas

Não é recente o uso de mais de um hélice na propulsão de embarcações, vários rebocadores fazem uso de par de propulsores azimutais e dessa forma dispensam o uso de leme, no entanto, nestes casos bem como em outros exemplos anteriores a este os hélices se encontram em eixos e estrutura mecânica diferentes. No entanto, este trabalho ao adotar o termo hélice dupla não se refere a esse tipo de tecnologia e sim algo muito mais recente na navegação que são os pares de hélice em mesmo eixo e mesma estrutura mecânica.

Figura 19 - Propulsor de Hélices Duplas



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

5.4 STP Twin propeller

Utiliza de dois hélices montados num mesmo eixo, girando na mesma direção e aletas direcionais integradas ao propulsor, obtêm-se, entre outras, as seguintes vantagens: alta confiabilidade devido à construção simples e com poucas peças móveis, redução do diâmetro do hélice sem comprometimento da eficiência, baixo consumo de combustível e baixo custo de manutenção. Esse propulsor tem 20% a mais de eficiência propulsora comparado a propulsores comuns.

Figura 20 - STP TWIN PROPELLER



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

5.5 CRP Hélices contra rotativas

O propulsor CRP consiste em dois hélices alinhados girando em sentidos opostos onde o hélice traseiro se aproveita da energia rotacional do turbilhão deixada pelo hélice dianteiro, e dessa forma o sistema como um todo apresenta substanciais ganhos de eficiência se comparados aos tradicionais modelos de propulsão visto que a exigência por potencia se torna menor e dessa forma reduz-se a necessidade de espaço e consumo de combustível. A contra rotação é uma maneira de aumentar a potencia sem aumentar o diâmetro da hélice e anular o efeito de torque nos motores de alta potencia. O impulso é dividido entre os dois hélices, sendo assim, a carga em cada uma bem como seus diâmetros são reduzidos o que reduz significativamente os efeitos da cavitação. Outras vantagens são o reduzido nível de ruído e a melhor manobrabilidade em baixas velocidades, o que é muito importante especialmente em portos e canais.

A contra rotação das hélices, também conhecido como hélices coaxiais contra rotativas, aplicam a potência máxima do pistão geralmente a um único motor turbohélice ou a movimentação de duas hélices em rotação contrária.

Duas hélices são dispostas uma atrás da outra, e a energia é transferida do motor através de uma engrenagem circular ou estimula a transmissão de engrenagens. Quando a velocidade é baixa a massa de ar que passa através do disco da hélice (pressão) faz com que uma quantidade significativa de fluxo de ar tangencie as lâminas giratórias. A energia desse fluxo de ar tangencial é desperdiçada em um único projeto-hélice. Para usar este esforço desperdiçado a colocação de uma segunda hélice atrás do primeiro aproveita o fluxo de ar perturbado.

Figura 21 - Propulsor de Hélices Duplas



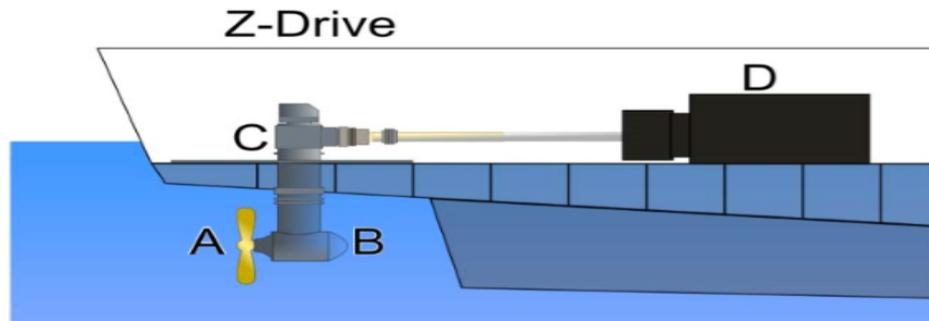
Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

5.6 Z-Drive

O Z-drive é um tipo de unidade de propulsão marítima. Especificamente, é um propulsor azimutal. O “pod” pode girar 360°, permitindo mudanças rápidas na direção de impulso e, assim, direção da embarcação. Isso elimina a necessidade de um leme convencional. Esta forma de transmissão de energia é chamado de Z-drive, porque o movimento de rotação tem que fazer duas voltas ângulo reto,

assemelhando-se, assim, a letra "Z". Tem a desvantagem de possuir duas "gearbox", causando perdas.

Figura 22 - Z-Drive

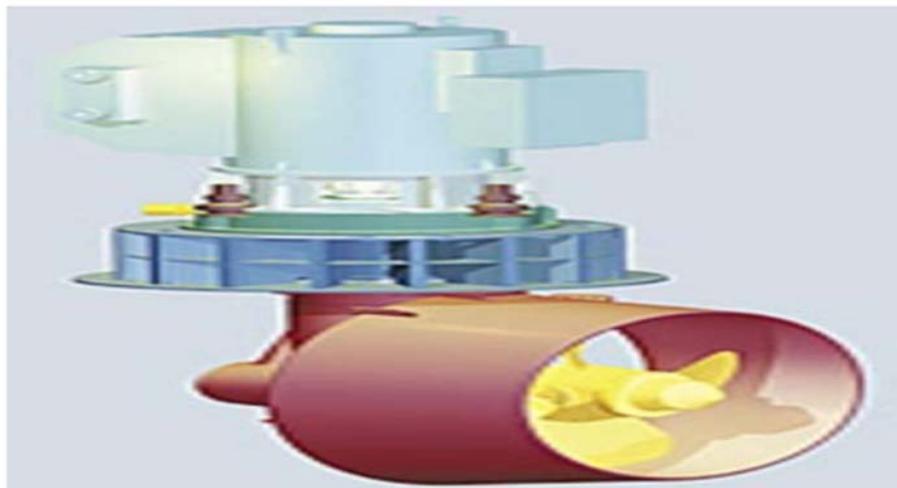


Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

5.7 L-Drive

O L-drive é um tipo de propulsor azimutal em que o "pod" é movido mecanicamente ao invés de eletricamente. O "pod" pode ser girado através de uma faixa de 360 graus, permitindo mudanças rápidas na direção da propulsão e eliminando a necessidade de um leme convencional. Esta forma de transmissão de energia é chamada uma L-drive, porque o movimento de rotação tem que fazer um ângulo reto, parecendo, assim, um pouco com a letra "L". É mais vantajoso do que a Z-Drive por possuir apenas uma "gearbox", diminuindo as perdas.

Figura 23 - Esquema de um L-Drive



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

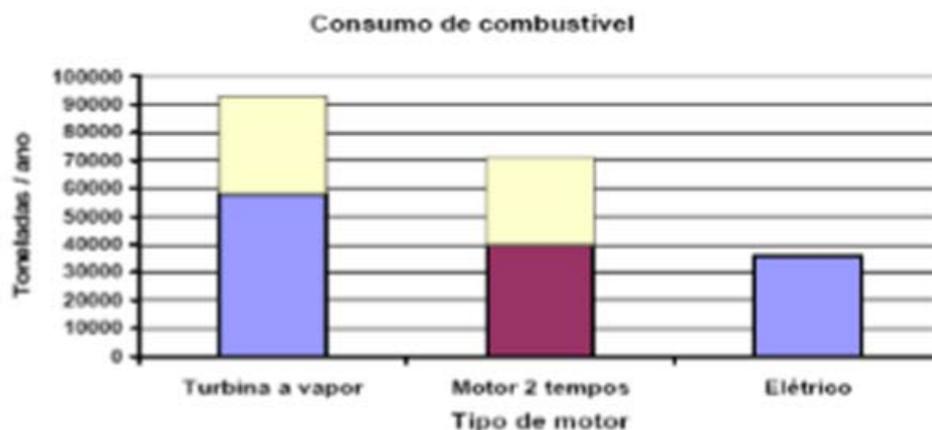
6 PRINCIPAIS VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

6.1 Redução do consumo de combustível

Em navios com propulsão mecânica tradicional, a velocidade do motor é que define a rotação do hélice; conseqüentemente, dependendo do perfil de operação do navio, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, associado às altas velocidades. Isto significa desperdício de combustível e excessivo desgaste mecânico .

Com o uso da propulsão elétrica, este problema é eliminado, e 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. Segundo Whitman (2001), estimou-se a eficiência energética em operações aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica de acordo com Newell (2000, p.67-85). Nota-se que essa diferença de eficiência é maior em baixas e media cargas, situação propicia para as embarcações de apoio marítimo já que é o caso em que fica a maior parte do tempo, como veremos a seguir:

Figura 24 - Consumo de combustível

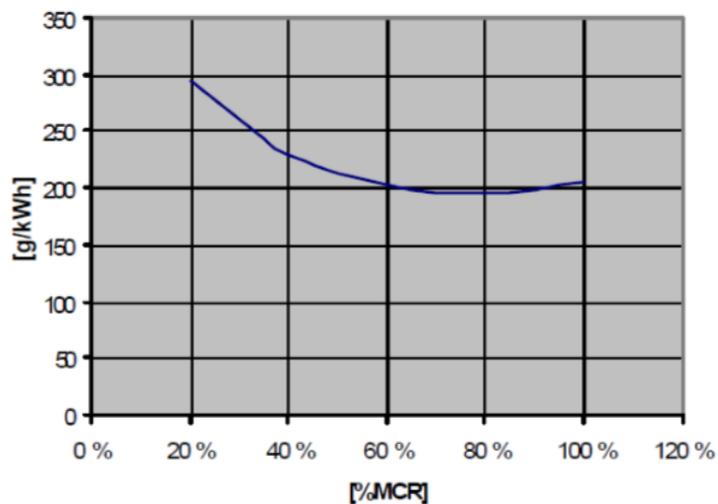


Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

A Marinha Americana estimou a eficiência energética em aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica.

De acordo com a linha de pesquisa apresentada em que comparou três tipos de instalações propulsoras diferentes, para um mesmo navio gaseiro, durante um ano de operação, a Propulsão Elétrica foi a que apresentou os melhores resultados e as maiores vantagens em relação ao consumo de combustível.

Figura 25 - Diagrama de combustível por potencia em relação a um motor Diesel



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

6.2 Redução da tripulação

A tendência para os futuros navios elétricos é de uma ampla difusão de sistemas auxiliares e acessórios alimentados por eletricidade, em substituição aos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Sistemas elétricos são mais fáceis de controlar à distância e possuem maior compatibilidade com controles eletrônicos. Esta tendência possibilita o incremento de automação com conseqüente redução de tripulação, proporcionando adicional benefício através da redução de custo operacional.

6.3 Flexibilidade do projeto

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros (podem 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 .

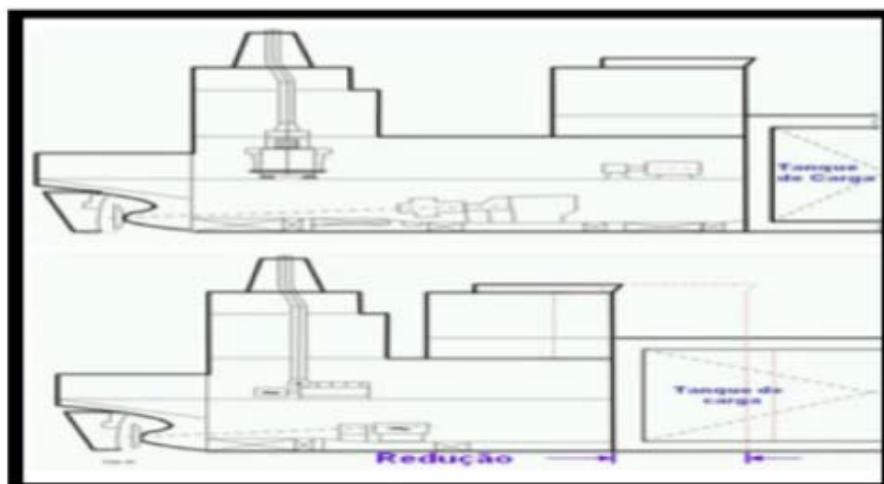
Observa-se na um ganho no espaço destinado ao transporte de cargas reposicionando a máquina diesel no convés superior, e desta forma, reduz-se o volume ocupado pelos dutos de admissão e exaustão dos motores.

Como resultado desta flexibilização, torna-se desnecessário concentrar equipamentos em praças de máquinas principais; sendo possível espalhar os compartimentos de máquinas pelo navio, em áreas menos críticas, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo .

No navio com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pelo navio será gerada pelos motores principais. Esta diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço.

A modularidade do sistema permite também que em altas velocidades sejam utilizados todos os dispositivos de acionamento principal e, nas velocidades econômicas sejam desligados os que não forem necessários.

Figura 26 - Distribuição dos equipamentos na praça de máquinas



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

6.4 Aumento da capacidade de sobrevivência do navio

A modularidade e a flexibilidade proporcionam um sistema de geração de energia e de propulsão redundantes, distribuídos e reconfiguráveis. Conseqüentemente os danos em um compartimento de máquinas, seja provocado por incêndio, alagamento ou simples mau funcionamento, podem facilmente ser detectados e “by-passados”, mantendo-se o funcionamento do sistema inalterado.

A facilidade para o redirecionamento da energia elétrica a bordo, possibilita uma elevada gama de possibilidades de ações para minimizar os efeitos decorrentes de múltiplas falhas simultâneas.

6.5 Aumento da vida útil do navio

Os navios militares modernos incorporam cada vez mais sensores e armas de alta complexidade tecnológica, que os tornam muito mais potentes do que os navios de gerações anteriores. Já os investimentos necessários para a aquisição destes meios têm crescido numa progressão ainda maior, tornando difícil justificar este gasto considerando o tempo de vida útil dos navios tradicionais.

Com o evento da automação dos sistemas de armas, nas décadas de 80 e 90, mais equipamentos elétricos e eletrônicos estão sendo incorporados aos navios, aumentando a demanda por energia elétrica. Isto vem fazendo com que os geradores instalados a bordo sejam de potência mais elevada, a fim de suprir a demanda já instalada e manter uma reserva para crescimento futuro. A futura adoção das armas elétricas, que estão atualmente em pleno desenvolvimento, tende a agravar ao extremo esta situação.

Com a propulsão elétrica, o cenário muda radicalmente. Os geradores de bordo alimentam simultaneamente a propulsão, as auxiliares e os sistemas de armas, através de um sistema de distribuição redundante e reconfigurável. Os motores são dimensionados para atender ao navio em velocidade máxima, com todos os sistemas vitais em operação.

Com isto, em velocidade normal, o navio possui capacidade de geração em excesso, capaz de atender todos os usuários com folga, assimilando sem

dificuldades as substituições ou inclusões futuras de novos equipamentos ou sistemas.

Os navios projetados com propulsão elétrica podem ter vida útil maior, da ordem de 50 anos, contra 25 ou 40 anos dos navios com propulsões tradicionais.

6.6 Redução dos custos de manutenção

A viabilidade da existência de uma tecnologia comum dentre as diversas plataformas navais (ex: navios de superfície e submarinos), com a adoção da Propulsão Elétrica, possibilitará a coordenação do desenvolvimento e aplicação de modelos comuns, ferramentas de projetos, métodos de fabricação, novos materiais, componentes, sistemas, contribuindo para significativas reduções no risco do projeto e maximizando os custos e a logística.

Uma vez que com a adoção da Propulsão Elétrica não são necessários motores auxiliares, esta redução na quantidade de equipamentos instalados resulta numa diminuição dos custos de manutenção. Associado a este fato, sabe-se que os equipamentos elétricos apresentam custos e períodos menores de manutenção e devido à elevada automação dos sistemas elétricos, as manutenções preditiva e preventiva são ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção.

6.7 Redução da emissão de poluentes

Atualmente todas as Marinhas do mundo são pressionadas pelos órgãos ambientais para que as mesmas em seus projetos de futuros navios, e também em relação aqueles já em funcionamento, apresentem uma redução na quantidade de poluentes emitidos durante a realização das operações militares. Todos os tipos de poluentes emitidos (gasosos, líquidos ou sólidos) estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações (ex: MARPOL) estão sendo elaboradas com requisitos mais rigorosos.

Em decorrência das pressões internacionais busca-se utilizar cada vez menos combustíveis fósseis. As emissões de gases poluentes oriundas da queima de óleo diesel e gasolina são os maiores responsáveis pelo efeito estufa. Neste contexto, a

propulsão elétrica está sendo fortemente indicada, principalmente para navios que operam em países que assinaram o Protocolo de Kyoto.

Durante a operação com navios civis e militares, deve-se sempre levar em conta os aspectos ambientais do transporte. Neste sentido, a utilização da propulsão elétrica apresenta vantagens em relação à propulsão mecânica, tais como:

- a) Redução das emissões de gases poluentes oriundos da queima do óleo diesel;
- b) Menor utilização de insumos que podem gerar resíduos poluidores; e
- c) Menor emissão de ruídos durante as viagens.

Claramente que a Propulsão Elétrica gera menos gases poluentes que os sistemas convencionais (que operam somente com turbinas a vapor ou motores diesel), pois o motor diesel opera constantemente no ponto ótimo de projeto, o que proporciona uma redução no consumo de combustível e conseqüentemente uma menor liberação de gases poluentes (ex: CO² - Dióxido Carbônico, NO_x – Óxido de Nitrogênio e SO_x – Óxido de Enxofre) durante as operações. É interessante destacar que o modelo utilizado na pesquisa considerou também a geração de gases durante a operação portuária e tempos com o navio parado durante as viagens.

No futuro não somente os poluentes emitidos durante a vida operativa do navio serão controlados, mas também todos aqueles produzidos durante a sua construção até o encerramento do período operativo do meio (desativação do meio naval). É uma nova filosofia, ainda de difícil aplicação prática, mas que está ganhando muita força nos dias atuais, devido à atitudes políticas de interesse mundial . Redução da Assinatura Acústica.

Na Propulsão Elétrica não é necessário haver o alinhamento das máquinas acionadoras principais com as linhas de eixo, tornando, portanto desnecessária a utilização de engrenagens redutoras. A eliminação desta engrenagem contribui significativamente para a redução nos níveis de ruído e vibração, garantindo desta forma uma significativa diminuição da assinatura acústica do meio, reduzindo conseqüentemente a possibilidade do navio ser detectado.

- d) Não é necessário usar hélice de passo controlável, haja vista que, o custo deste hélice de passo fixo representa apenas 8% ;
- e) Redução do ruído do motor e da vibração transmitida do eixo ao hélice; e
- f) Flexibilidade no gerenciamento da distribuição da potência em operações normais e rápida recuperação após a detecção de defeitos (incêndios, alagamentos, ataques a bala, e outros tipos de falhas).

7 APRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA ATUAL

7.1 Motor Vessel DEEP STIM BRAZIL 2

Figura 28 - M/V DEEP STIM BRAZIL 2

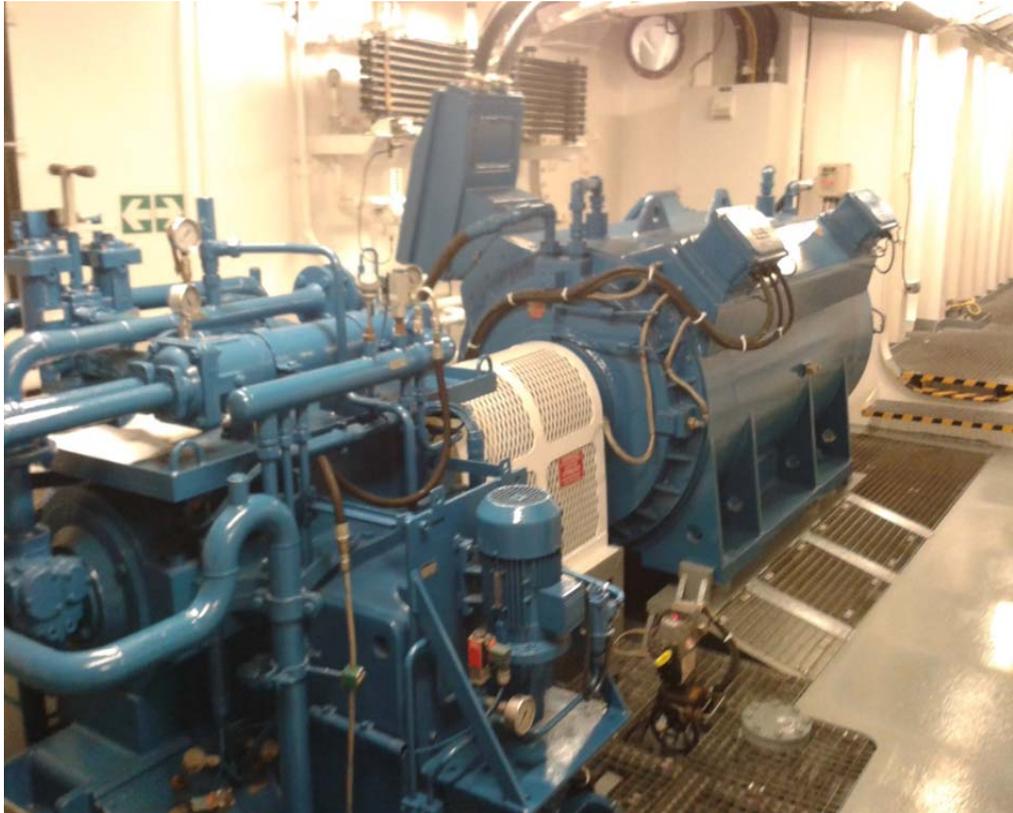


Fonte: Arquivo pessoal.

O M/V Deep Stim Brazil 2 da empresa BRAM Offshore , embarcação de offshore na operação de Estimulação de Poços é um exemplo de embarcação movida a propulsão elétrica na qual com seus 4 geradores C 1512 da Caterpillar e 2 motores elétricos da WEG equipamentos elétricos , possui 2 Bow Thrusters e 2 Stern Thrusters todos com motores elétricos da WEG , cada conjunto propulsor é formado por:

- a) Motor elétrico
- b) Caixa redutora de engrenagens
- c) Pequeno eixo
- d) Hélice

Figura 29 - Conjunto do motor elétrico e Caixa Redutora



Fonte: Arquivo pessoal.

A embarcação M/V Deep Stim Brazil 2 em comparação a qualquer outra embarcação offshore com propulsão mecânica convencional tem sua eficiência comprovada com o menor consumo de combustível em relação a outra embarcação do mesmo tamanho e modelo , menor ruído na praça de máquinas , maior espaço para carga , manutenção com menor custo.

7.2 O Motor elétrico de propulsão principal

Figura 30 - Dados do Motor Elétrico



Fonte: Arquivo pessoal.

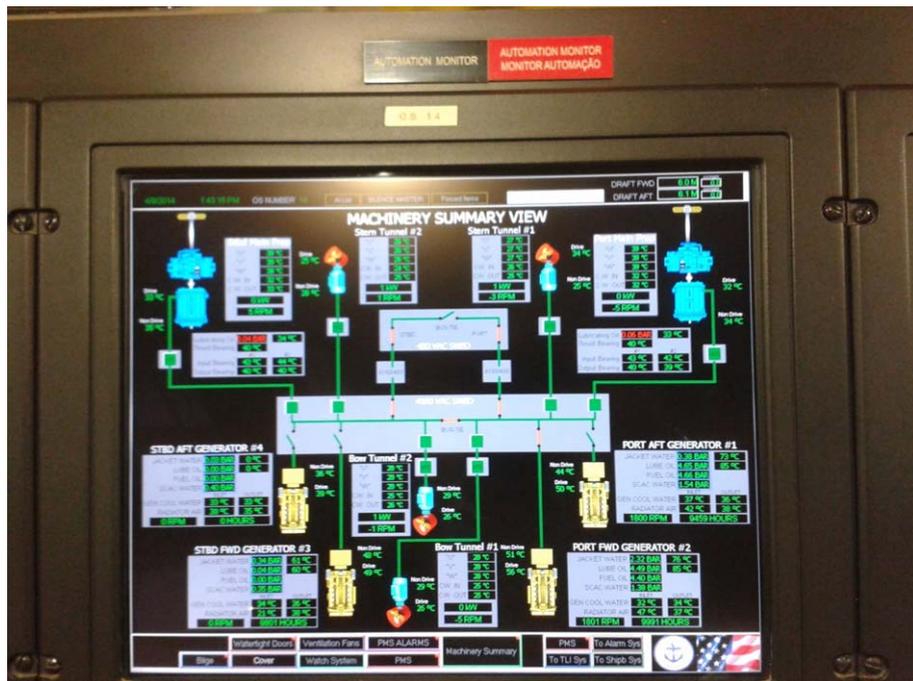
O motor elétrico usado na propulsão do M/V Deep Stim Brazil 2 tem como fabricante a WEG equipamentos elétricos S.A , motor atual e moderno cujos dados técnicos são:

- a) Motor de indução trifásico
- b) Modelo : WGM 560B 2500 W 6P 4000 V B3
- c) Frequencia 60 Hz
- d) 1193 rpm
- e) 133 a
- f) Código IP 55W
- g) INS F IL/IN 6
- h) AMB 50°C
- i) Cooling W J 0°C / 1W
- j) Peso 10260 Kg
- k) Stator 4000 V / code 9100
- l) Data 25/january/2010

7.3 Painel de controle

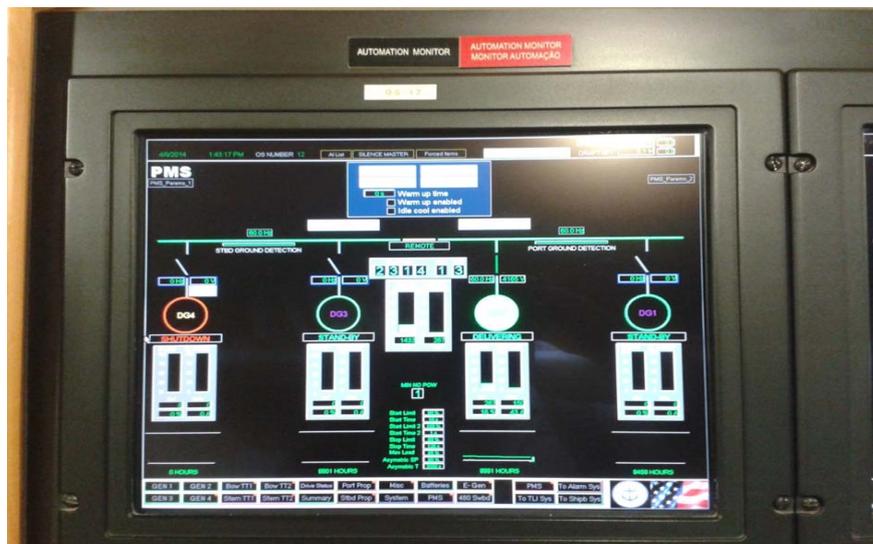
O Painel de Controle utilizado a bordo do M/V Deep Stim Brazil 2 que fica localizado na sala de controle de máquinas, é um sistema que tem a representação dos geradores, thrusters e motores elétricos com sistema de alarme acoplado para detecção de eventuais falhas ou problemas.

Figura 31 - Painel de Controle



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 32 - Painel de controle com os geradores



Fonte: Arquivo pessoal.

7.4 Thrusters

O M/V Deep Stim Brazil 2, possui 2 Bow thrusters em sua proa e 2 Stern thrusters na popa da embarcação tendo assim uma excelente capacidade de manobra e uma variação muito pequena quando em operação DP (Dynamic Position), Posicionamento Dinamico devido a natureza de sua operação.

Figura 33 - Stern Thruster



Fonte: Arquivo pessoal.

7.5 Geradores

Os geradores de bordo são Caterpillar C1512, os 4 estão dispostos na praça de máquinas, em um espaço menor que normalmente seria usado para acomodar 2 Motores de Combustão Principal MCP, seus longos eixos e as grandes caixas redutoras, com esta economia de espaço e podendo utilizar motores menores, pode ser aumentada a área de carga e consumir menos combustível, reduzir a emissão de poluentes graças ao advento da propulsão elétrica em relação a propulsão mecânica tradicional.

Figura 34 - Geradores na praça de máquinas



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 35 - Vista frontal do gerador

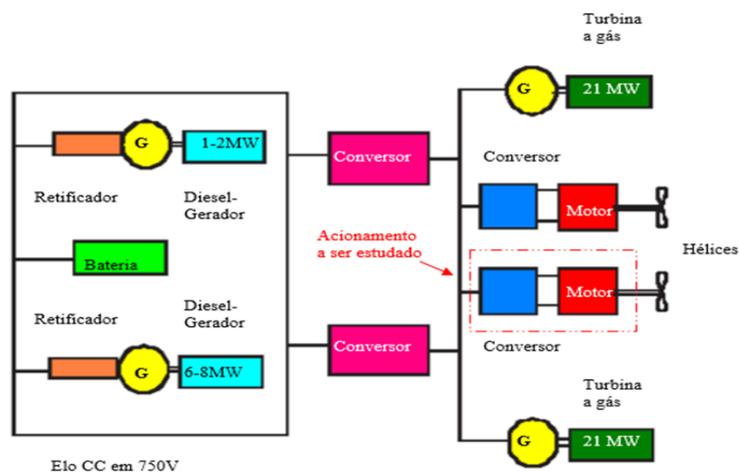


Fonte: Arquivo pessoal.

Algumas vantagens associadas à adoção do acionamento elétrico são listadas a seguir:

- a) Excelente controle de velocidade e torque em toda faixa de velocidade;
- b) Facilidade para adoção de controles automáticos e remotos;
- c) Flexibilidade do Projeto;

Figura 36 - Configuração do sistema elétrico do Contratorpedeiro " Type 45 "



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

- d) Favorecimento das redundâncias dos sistemas;
- e) Redução dos Custos de Manutenção;
- f) Redução da Emissão de Poluentes;
- g) Redução do ruído do motor e da vibração transmitida do eixo ao hélice;
- h) Flexibilidade no gerenciamento da distribuição da potência em operações normais e rápida recuperação após a detecção de defeitos (incêndios, alagamentos e outros tipos de falhas).

Figura 37 - M/V DEEP STIM BRAZIL 2 no fundeio na baía da Guanabara



Fonte: Arquivo pessoal.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi visto neste trabalho, a aplicação da propulsão elétrica é uma boa alternativa em relação a propulsão mecânica tradicional em embarcações de apoio marítimo. O sucesso nas tentativas recentes, de aumentar a densidade de potência dos motores elétricos empregados neste tipo de propulsão, permite que embarcações de apoio marítimo possam se beneficiar das vantagens inerentes ao uso da propulsão elétrica.

A aplicação da propulsão elétrica em navios tem uma história de sucessos ao longo dos últimos anos.

O sucesso nas tentativas recentes, de aumentar a densidade de potência dos motores elétricos empregados neste tipo de propulsão, permite que navios militares possam se beneficiar das vantagens inerentes ao uso da propulsão elétrica em um futuro próximo.

REFERENCIAS BIOGRÁFICAS

ADNANES, Alf Kåre. **Maritime electrical installations and diesel electric propulsion**. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.372.301>>. Acesso em: maio 2014.

ARRINGTON, J. W. **The analysis of components, designs and operation for electric propulsion and integrated electrical system**. Monterey. Califórnia, USA, 1988.

FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L. **Propulsão elétrica: histórico e perspectivas futuras**. 20º Congresso Nacional de Transportes Marítimos. Construção Naval e Offshore - EXPONAVAL 2004, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval - SOBENA.

HARRINGTON, R. L. **Reliability and maintainability analyses of shipboard systems**. In: Marine Technology. Society of Naval Architects and Marine Engineers SNAME. New York, EUA, 1970.

MCCOY, T. J. **Trends in ship electric propulsion power engineering society summer meeting**. vol. 1, p. 343-346, IEEE, 2002.

NEWELL, J. M.; YOUNG, S. S. **Beyond electric ship**. Transactions ImarE.

PÊGO, J. et al. **Construction of a test facility for further research of ship propulsion systems**. Emirates Journal for Engineering Research, 10 (2), 1-8 2005.

PEREIRA, N. N.; BRINATI H. L. **Estudo do impacto da propulsão a diesel-elétrica na emissão de gases poluentes**. 22º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore - EXPONAVAL 2006, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval - SOBENA.

GLOSSÁRIO

Símbolo Descrição

USN - United States Navy – Marinha Americana

RN - Royal Navy – Marinha Inglesa.

CC - Corrente Contínua.

CA - Corrente Alternada.

MW - Mega Watts – 10⁶Watts.

AIM - Advanced Induction Motor - Motor de Indução Avançado.

HPO - High Phase Order - Motor Multifásico.

Type 45 - Classe dos novos Contratorpedeiros da Marinha Real Inglesa.

MATLAB - Programa desenvolvido pela “Math Works Corp”.

SIMULINK - Pacote gráfico do Programa MATLAB.

FOC - Field Oriented Control – Controle Vetorial Orientado pelo Campo.

USS - United States Ship – Navio da Marinha Americana.

HTSAC - High Temperature Superconducting AC Synchronous Motors - Motores Síncronos com materiais supercondutores em alta temperatura.

AMSC - American Superconductor Corporation.

SDCHM - The Superconducting DC Homopolar Motor - Motor homopolar com material supercondutor em corrente contínua.

DSP - Dispositivo de Acionamento Principal.

ESTD - Electric Ship Technology Demonstrator - Base Terrestre para testes de Planta Propulsora Elétrica para Navios Militares.

IFEP - Integrated Full Electric Propulsion - Planta de Propulsão Elétrica Integrada.

NRAC - Naval Research Advisory Committee - Comitê Consultor de Pesquisa Naval.

HMS - Her Majesty’s Ship.

Type 42 - Classe dos antigos Contratorpedeiros da Marinha Real Inglesa.

CO₂ - Dióxido Carbônico.

NO_x - Óxido de Nitrogênio.

SO_x - Óxido de Enxofre.

SCR - Retificador Controlado a Silício, também chamado de tiristor.

MARPOL - Poluição Marítima (Marine Pollution - MARPOL).

MOSFET - Transistores de potência de efeito de campo metal-óxido- semiconductor.

IGBT - Transistores bipolares de porta isolada.

TRIACS - Tiristores bidirecionais de porta controlada.

GTO - Tiristores de desligamento por porta.

IGCT - Tiristores comutados com porta integrada.

GATE - Gatilho ou terminal de controle.

Cycloconverter - Cicloconversor.

CSI - Current-Source Inversor - Inversor Fonte de Corrente.

VSC - Voltage-Source Inverter - Inversor Fonte de Tensão.

LCI - Line Commuted Inversor –Inversor Comutado pela Carga.

PWM - Pulse-Width Modulated - Modulação por Largura de Pulso. Excitação

f - Freqüência de excitação. Sn Velocidade síncrona em rpm.

P - Número de pólos.

s - Escorregamento.

n - Representa a velocidade real do rotor em rpm.

rotorf - Freqüência do rotor.

R1 - Resistência do enrolamento do estator por fase.

1X - Reatância de dispersão do enrolamento do estator por fase.

feR - Resistência correspondente às perdas do núcleo magnético por fase. mX Reatância de magnetização por fase.

2R ' - Resistência do rotor refletida ao estator por fase.

2X ' - Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator por fase.

1I & - Corrente de fase do estator.

$2I'_{\&}$ - Corrente de fase do rotor refletida ao estator.

$mI_{\&}$ - Corrente de magnetização por fase.

$1E_{\&}$ - Força eletromotriz induzida refletida ao estator.

$1V_{\&}$ - Tensão monofásica aplicada ao enrolamento do estator.

PUC-RS - Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul.

UFPB - Universidade Federal da Paraíba.

AGSS - Tensão de Superfície do Entreferro (“Airgap Shear Stress”).

$r\sigma$ - Tensão de Superfície do Entreferro – (AGSS)[kNm⁻²].

τ - Torque. r_r Raio do rotor. l_r Comprimento do rotor.

ω_r - Velocidade angular do rotor.

θ - Ângulo de defasagem angular entre os enrolamentos da fase “a” do estator e “a” do rotor.

β - Ângulo de defasagem entre o enrolamento das fases “a” e “b” do estator (120° elétricos).

s_a - Fase A do estator.

s_b - Fase B do estator.

s_c - Fase C do estator.

r_a - Fase A do rotor.

r_b - Fase B do rotor.

r_c - Fase C do rotor.

(abc) - Referencial Matricial Completo Trifásico (Natural).

($\alpha\beta 0$) - Referencial Ortogonal Estacionário (fixo no estator).

(dq0) - Referencial Ortogonal Girante na Velocidade Angular Mecânica Síncrona.

m - Indutância mútua entre fases dos enrolamentos do estator e do rotor.

L_1 - Indutância própria por fase de uma bobina do estator.

L_2 - Indutância própria por fase de uma bobina do rotor.

L_{ss} - Indutâncias próprias de estator.

L_{rr} - Indutâncias próprias de rotor.

L_{sr} - Indutância mútua entre os enrolamentos do estator e do rotor.

p - Derivada (d/dt).

G_{sr} - Matriz de indutância rotacional (estator e rotor).

G_{rr} - Matriz de indutância rotacional (rotor).

G_{ss} - Matriz de indutância rotacional (estator).

1 - Grandeza elétrica referida ao estator.

2 - Grandeza elétrica referida ao rotor.

R_1 - Resistência do enrolamento do estator.

R_2 - Resistência do enrolamento do rotor.

λ - Enlace de fluxo associado ao circuito total de indução de tensão de um circuito magnético ($\lambda = N \cdot \psi$).

N - Número de espiras.

ψ - Fluxo magnético de uma única espira.

L_H - Indutância de magnetização.

L_1 - Indutâncias próprias de estator.

L_2 - Indutâncias próprias de rotor.

$L_{\sigma 1}$ - Indutâncias de dispersão de estator.

$L_{\sigma 2}$ - Indutâncias de dispersão de rotor.

ω_{mec} - Velocidade angular mecânica do rotor.

ω_1 - Velocidade síncrona.

ω_k - Velocidade no referencial genérico k .

$\omega_2 = \omega_k - \omega_{mec}$.

ω_r - Velocidade angular mecânica do rotor.

\tan - Tangente.

n - Número de fases.

P - Potência elétrica total fornecida ao motor.

V - Perda ôhmica nos enrolamentos.

W - Energia magnética necessária à manutenção do campo.

$mecd\ \omega m\ \pi\ 2$ - Potência mecânica desenvolvida pelo motor.

NP - Número de pares de pólos do motor de indução. dm Conjugado eletromagnético.

J - Momento de inércia. DK Coeficiente de atrito viscoso. Im Conjugado de carga. σ Coeficiente de dispersão global.

A - Matriz A do modelo do motor em forma de Equação de Estado.

B - Matriz B do modelo do motor em forma de Equação de Estado.

K - Matriz dos fatores de velocidade.

A11 - Submatriz da matriz A.

A12 - Submatriz diagonal da matriz A.

A21 - Submatriz diagonal da matriz A.

A22 - Submatriz da matriz A.

FOC - Controle por Orientação de Campo – “Field Oriented Control”.

λ_r - Enlace de fluxo do rotor.

T_{carga} - Torque da carga.

Telemag - Torque eletromagnético.

χ - É o vetor de estados, isto é, o estado físico.

u - É o vetor de entradas.

Y - É o vetor de saídas.