

MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

FRANCINNY NERY SARZEDAS AMARANTE

PROPULSÃO ELÉTRICA PARA NAVIOS MERCANTES

RIO DE JANEIRO

2015

FRANCINNY NERY SARZEDAS AMARANTE

PROPULSÃO ELÉTRICA PARA NAVIOS MERCANTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: MSc Eng Paulo Roberto Batista Pinto

RIO DE JANEIRO

2015

FRANCINNY NERY SARZEDAS AMARANTE

PROPULSÃO ELÉTRICA PARA NAVIOS MERCANTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado no Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data de aprovação: ___/___/___

Orientador: MSc Eng Paulo Roberto Batista Pinto

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe por não ter me deixado desistir do meu sonho, sempre me dando força e me incentivando para que eu alcançasse os meus objetivos e me mostrando que nem sempre obtemos êxito no que almejamos, talvez por não ser a hora certa ou por não ser a melhor coisa pra nós.

Ao meu irmão que sempre me manteve forte dizendo que eu era um exemplo pra ele, que ele se espelhava em mim, para que eu continuasse seguindo e querendo que ele continuasse com esse pensamento.

Ao meu pai que, apesar de não ser mais tão presente em minha vida, sempre fez questão de mostrar que se orgulhava de mim mesmo que eu tenha seguido um caminho completamente diferente do que ele planejou pra mim.

Ao meu orientador que sempre me deixou expor minhas opiniões e meus desejos, me ajudando a encontrar o melhor caminho para concluir esse trabalho. Além de sempre se mostrar um excelente profissional, mostrando como o mundo não é tranquilo como pensamos nos preparando sempre para o que nos aguarda lá fora.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo proporcionar informações gerais sobre a Propulsão Elétrica aplicada a navios, dando ênfase a Navios Mercantes. Inicialmente, faz-se uma abordagem mais superficial da Propulsão Elétrica. Após isso, procura-se caracterizar as primeiras aplicações e sua evolução até os dias atuais, apresentando os principais desenvolvimentos nos últimos anos. Em seguida, apresentam-se os meios de Propulsão Elétrica tanto por Corrente Contínua quanto por Corrente Alternada, a fim de mostrar as dificuldades encontradas no início e suas soluções. Por fim, compara-se a Propulsão Elétrica com outros tipos de propulsão, citando as principais vantagens desse tipo de propulsão.

Palavras-chave: Propulsão. Propulsão Elétrica. Navios Mercantes. Evolução. Corrente Contínua. Corrente Alternada.

ABSTRACT

This work aims to provide general information about the Electric Propulsion applied to ships, emphasizing the Merchant Ships. Initially, it is a more superficial approach to Electric Propulsion. After that, it tries to characterize the first applications and its evolution to the present day, with major developments in recent years. Then present the Electric Propulsion means both Direct Current as by Alternating Current, in order to show the difficulties encountered at the beginning and their solutions. Finally, it compares the Electric Propulsion with other types of propulsion, citing the main advantages of this type of propulsion.

Keywords: Propulsion. Electric Propulsion. Merchant ships. Evolution. Direct Current. Alternating Current.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	USS “Júpiter”	9
Figura 2:	USS “Langley”	9
Figura 3:	USS “New México”	10
Figura 4:	“Normandie”	11
Figura 5:	Sistema de Acionamento Elétrico Integrado	14
Figura 6:	Diagrama de um Sistema de Propulsão Elétrica	15
Figura 7:	Consumo de combustível	16
Figura 8:	Distribuição dos equipamentos na Praça de Máquinas	17
Figura 9:	Esquema de um motor de ímã permanente	20
Figura 10:	SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências	25
Figura 11:	Tiristor de desligamento por porta	26
Figura 12:	Transistor bipolar de porta isolada	27
Figura 13:	Inversor Fonte de Corrente (CSI) alimentado por retificador	28
Figura 14:	Inversor Fonte de Tensão (VSC) alimentado por retificador	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	BREVE HISTÓRICO	9
2.1	Primeiras aplicações	9
2.2	Cenário atual	12
3	CARACTERÍSTICAS DA PROPULSÃO ELÉTRICA	14
3.1	Comparação entre a Propulsão Elétrica e a Propulsão Mecânica	14
3.2	Principais vantagens	16
3.2.1	Redução do consumo de combustível	16
3.2.2	Redução da tripulação	17
3.2.3	Flexibilidade de Projeto	17
3.2.4	Aumento da capacidade de sobrevivência do navio	18
3.2.5	Aumento da vida útil do navio	18
3.2.6	Redução dos custos de manutenção	18
3.2.7	Redução da emissão de poluentes	19
3.2.8	Redução da Assinatura Acústica	19
4	TIPOS DE MOTOR	20
4.1	Motor de Corrente Contínua	20
4.2	Motor de Corrente Alternada	21
4.2.1	Tipos de partida	22
4.2.2	Controle de velocidade	23
5	ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	24
5.1	Chaves semicondutoras de potência	24
5.1.1	Retificador controlado de silício	25
5.1.2	Tiristor de desligamento por porta	25
5.1.3	Transistor bipolar de porta isolada	26
5.2	Conversores de frequência	27
5.2.1	Cicloconversor	27
5.2.2	Inversor Fonte de Corrente (CSI)	28
5.2.3	Conversor Fonte de Tensão (VSC)	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A importância dos mares no cenário econômico atual é inegável. Quando um navio é projetado, fatores como flexibilidade operativa e robustez, 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. Mas um dos aspectos mais importantes do projeto é o meio de propulsão que será empregado, pois ele influenciará todos os fatores já citados, dentre outros.

A Propulsão Elétrica vem conquistando diversos setores da indústria marítima e é a alternativa que mais oferece as características tão almejadas pelos armadores, sendo a melhor opção para reduzir custos operacionais. Inicialmente, foi adotada em projetos quebra-gelos e navios especializados, mas hoje já é comum em navios de cruzeiros como o “Transatlântico Queen Mary II” e nas Marinhas dos Estados Unidos e do Reino Unido. [5]

A Propulsão Elétrica utiliza a energia elétrica oferecida pelos motores elétricos. Essa energia possui a versatilidade de poder ser convertida para Corrente Contínua ou Alternada, inclusive com diferentes níveis de tensão e de frequência. Essa capacidade de conversão, assegurada pela Eletrônica de Potência, é fundamental para o crescimento das aplicações da eletricidade a bordo de navios.

A Propulsão Mecânica está perdendo mercado em virtude do sucesso que a Propulsão Elétrica teve após ser inserida no mercado. Pode-se concluir que, devido a esse sucesso, os mares sejam finalmente conquistados pela energia elétrica num pequeno horizonte temporal.

2 BREVE HISTÓRICO

Não é de hoje que a Propulsão Elétrica vem conquistando seu espaço no meio marítimo, a seguir veremos um breve histórico desse meio de propulsão.

2.1 Primeiras aplicações

A propulsão de navios e submarinos utilizando motores elétricos não é uma novidade. A primeira aplicação de Propulsão Elétrica no nosso meio foi no século XIX, com a construção e operação de uma pequena lancha movida a baterias para o transporte de pessoas na Rússia.

A Propulsão Elétrica iniciou-se, com mais visibilidade, com um experimento no navio carvoeiro USS “Júpiter” em 1913. Ele era dotado de dois eixos e sua velocidade máxima chegava a 14 nós. Seu sistema propulsor era composto de um turbo-gerador em Corrente Contínua que alimentava dois motores elétricos ligados diretamente aos eixos.

Figura 1: USS “Júpiter”



Fonte: [1]

O experimento foi um sucesso e o navio foi convertido no primeiro navio-aeródromo da Marinha dos EUA (USN), o USS “Langley” em 1922. Este navio ficou em operação até 1942, quando o navio foi afundado em combate.

Figura 2: USS “Langley”



Fonte: [8]

A Propulsão Elétrica evoluiu muito nos EUA, mas muito pouco na Europa. O que havia em operação eram os pequenos navios de carga “Mjolner” e “Wulsty Castle”, construídos na Suécia no início do século XX. Esses navios tinham como meio de propulsão dois turbo-geradores de 655 KW que alimentavam dois motores com rotor bobinado que acionavam um único eixo através de uma engrenagem redutora. Suas velocidades eram mantidas constantes na maior parte do tempo, seus turbo-geradores eram projetados para operar em uma rotação constante e mudanças de velocidades eram feitas através de resistências que eram inseridas no circuito do rotor dos motores. Esse sistema só podia ser usado em navios que não precisassem de grandes variações de velocidade e com pequenas potências instaladas. Porém, esses navios mostraram ser 40% mais econômicos que um navio convencional da época. [5]

Em 1915, a Marinha dos EUA decidiu instalar um sistema de propulsão elétrica no USS “New México” com 30 MW de potência instalada e que foi projetada para uma velocidade de 21 nós.

Figura 3: USS “New México”



Fonte: [9]

Seu sistema propulsor era construído por dois turbo-geradores de 11,5 MW que alimentavam quatro motores elétricos de indução diretamente conectados a quatro eixos. Um grande avanço tecnológico presente nesse navio foi a implementação de motores do tipo gaiola de esquilo, que eram capazes de fornecer um torque quase constante ao longo de toda faixa de velocidade do rotor, o que acabava com o uso de resistências inseridas no circuito. Tal motor também era capaz de fornecer torque 17 vezes maior ao disponível em motores com rotor bobinado da época. Esses motores eram dotados de chaves comutadoras de polos,

o que permitia a operação com 24 ou 36 polos. Este dispositivo proporcionava um controle grosseiro da velocidade do navio, sendo o ajuste fino obtido pela variação da rotação das turbinas. [5]

Entre a 1ª e a 2ª Guerra Mundial, devido ao sucesso obtido com esse meio de propulsão e a percepção dos seus benefícios, foram construídos 50 navios pela Marinha dos EUA utilizando esse sistema, incluindo navios de guerra e dois navios aeródromo. Dentre esses navios estavam o USS “New México”, já mencionado anteriormente, e o segundo e o terceiro navios-aeródromo da Marinha Americana, USS “Lexington” e USS “Saratoga”, com potência instalada de 135 MW. [5]

No que se refere a Navios Mercantes, o transatlântico francês “Normandie” é o melhor exemplo da tendência da época a utilizar a propulsão elétrica no lugar de instalações convencionais com engrenagens redutoras. Lançado em 1932 na França, o projeto do “Normandie” permitiu que ele igualasse a velocidade do “Queen Mary”, alcançando 32,2 nós.

Figura 4: “Normandie”



Fonte: [7]

Seu sistema de propulsão consistia de quatro turbo-geradores totalizando 119,3 MW instalados. Vantagens como a alta razão de redução obtida, a eliminação de turbinas reversoras, a redução do número necessário de turbinas com conseqüente redução no consumo de combustível e uma maior confiabilidade do sistema foram percebidas com esses sistemas de propulsão.

O “Normandie” era constituído de quatro motores síncronos acionados por quatro turbo-geradores arranjados de maneira a formarem duas unidades

separadas, com dois turbo-geradores cada. Sua velocidade era controlada de forma similar a do USS “New México” pela mudança de velocidade de rotação dos turbo-geradores.

Durante a 2ª Guerra Mundial, mais de 160 navios de escolta foram construídos para a Marinha dos EUA com Propulsão Elétrica, usando turbo ou diesel geradores na faixa de 4,5 a 9,0 MW. Por volta de 500 navios de pequeno porte foram equipados com sistemas de Propulsão Elétrica em Corrente Contínua na faixa de 225 kW a 15 MW. O número de navios dotados desse meio de propulsão aumentou principalmente devido a falta de capacidade para fabricação de engrenagens durante esse período. [5]

Porém, por volta de 1940, sistemas de engrenagens de dupla redução haviam se tornado competitivos e as desvantagens da Propulsão Elétrica ligadas ao maior peso, maior volume necessário e menor eficiência na época inibiram a expansão do uso de tal sistema em larga escala. As engrenagens redutoras tinham se tornado mais leves e tinham tido uma melhoria no desempenho acústico. Essa situação prevaleceu até o início do século XXI, quando a capacidade de transmissão mecânica de energia atingiu seu limite tecnológico e de viabilidade econômica.

Nas décadas de 1980 e 1990, avanços tecnológicos, na área de Eletrônica de Potência e de construção dos motores, tornaram a transmissão elétrica mais eficiente, versátil e compacta, possibilitando o retorno do emprego da propulsão elétrica em diversas classes de navios, como quebra-gelos, oceanográficos, tanque e numerosos transatlânticos. [2]

2.2 Cenário atual

Atualmente, pesquisas para a definição das melhores alternativas de tecnologia envolvendo Propulsão Elétrica estão sempre evoluindo. As pesquisas de motores propulsores para aplicação naval e militar apresentam 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. [2]

Uma das maiores fornecedoras de tecnologia na área da Propulsão Elétrica para navios de transporte de gás liquefeito natural é a General Electric Power

Conversion. Ela foi a primeira empresa a equipar com propulsão elétrica um navio tanque completo. Em seus contratos estão inclusos conversores, motores de indução, transformadores, geradores, conjuntos de manobra de geração e distribuição e sistemas de controle de propulsão. [10]

Os conversores e motores da General Electric são desenvolvidos e aperfeiçoados para que os sistemas propulsores sejam de fácil manutenção. Tais sistemas proporcionam alta eficiência, viabilidade e flexibilidade. Hoje, ela é a referência em aplicações navais que combinam motores de indução de alta potência com acionamento PWM (Modulação por Largura de Pulso) dos inversores de frequência. [10]

Normalmente, os navios tanques de gás liquefeito natural são dotados de propulsão com base em caldeiras e turbinas a vapor. Mas, muitos armadores tem adotado motores bicomustíveis que combinados com a propulsão elétrica tem apresentado eficiência com até 30% em altas cargas. [10]

3 CARACTERÍSTICAS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

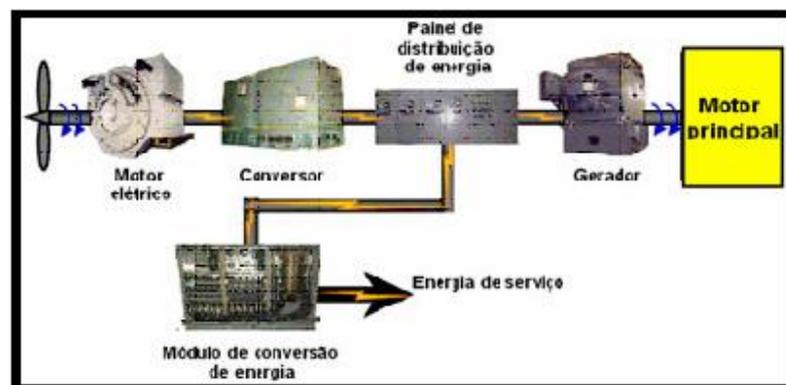
A Propulsão Elétrica possui muitos aspectos positivos se comparada a outros meios propulsivos, veremos uma comparação com a Propulsão Mecânica e as principais vantagens já observadas.

3.1 Comparação entre a Propulsão Elétrica e a Propulsão Mecânica

O conceito de Propulsão Elétrica Integrada, usando o acionamento elétrico, é a tecnologia mais promissora nos desenvolvimentos da engenharia naval atual. A Propulsão Elétrica é um sistema composto por um gerador elétrico, acionado por um dispositivo de acionamento principal que fornece energia para um motor elétrico que aciona o hélice do navio. Sua principal característica é o controle da velocidade do navio pelo controle da rotação do motor elétrico. Nesse sistema, não temos dois sistemas de potência separados e sim, 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 em conformidade com as alterações de demanda.

Porém, 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 5: Sistema de Acionamento Elétrico Integrado



Fonte: [2]

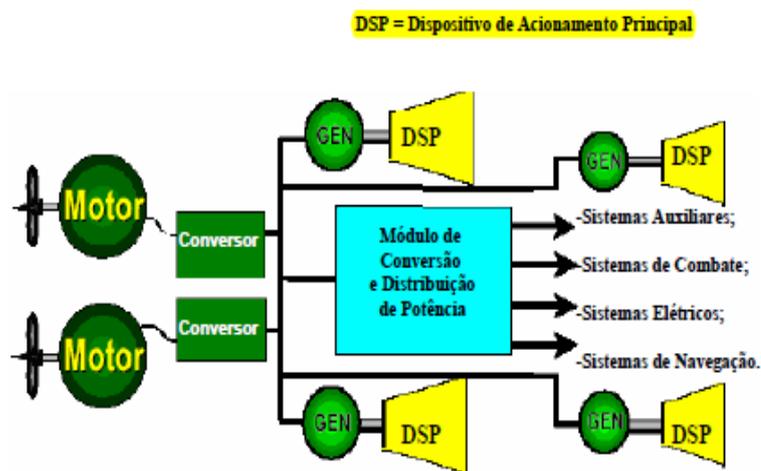
Num navio que possui a Propulsão Mecânica tradicional, é a rotação do motor diesel quem define a rotação do hélice, dessa forma, o motor em algumas condições

de operação não funciona na faixa do rendimento ótimo, gerando um inevitável desperdício de combustível.

No sistema de propulsão mecânica 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. Nesse sistema, é necessário um diesel-gerador auxiliar, instalado em local separado do sistema de propulsão que fornecerá a potência elétrica para o atendimento de todos os sistemas elétricos do navio.

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. Esse sistema consiste 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.

Figura 6: Diagrama de um Sistema de Propulsão Elétrica



Fonte: [2]

No sistema de Propulsão Elétrica, a eficiência não é tão sensível à variação da velocidade do eixo propulsor como na transmissão mecânica convencional. Portanto, quando o navio está operando com velocidade mais baixa, a eficiência da transmissão elétrica é maior que a da transmissão mecânica. Por esse motivo, a Propulsão Elétrica é muito empregada em navios militares já que os mesmos operam com grandes variações de velocidade, dependendo da missão.

3.2 Principais vantagens

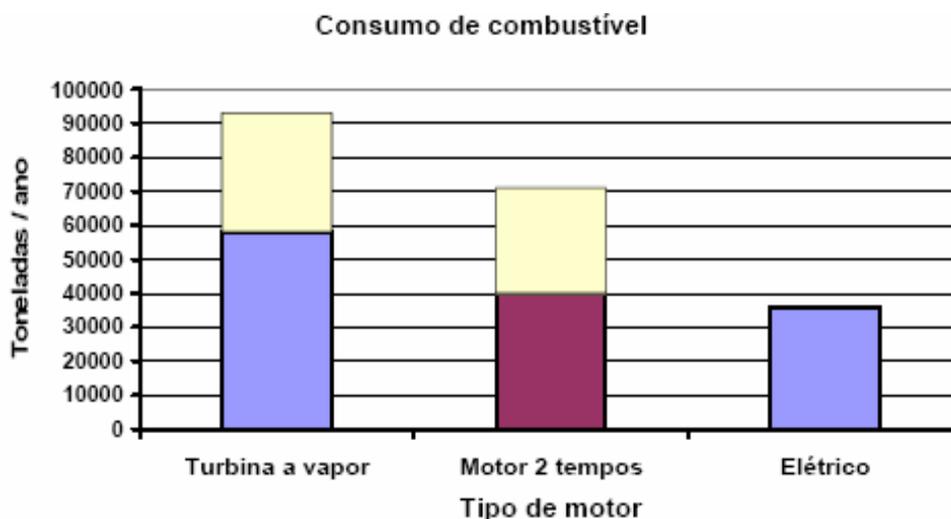
Um fato que incentivou a atual preferência pela propulsão elétrica é o reconhecimento da importância de projetar visando custo de vida útil, em lugar de minimizar custos de obtenção iniciais às custas de altas despesas de manutenção e modernização ao longo da vida do meio. [2] Com relação às principais vantagens, pode-se citar:

3.2.1 Redução do consumo de combustível

Quando usamos a propulsão mecânica tradicional, a rotação do hélice é definida pela velocidade do motor; com isso, dependendo do perfil de operação do navio, pode ser que o motor não opere na faixa de rendimento ótimo, associado às altas velocidades. Isso leva ao desperdício de combustível e excessivo desgaste mecânico.

Com a Propulsão Elétrica, esse problema é eliminado e o motor primário pode operar no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice. De acordo com o gráfico abaixo, que comparou três tipos de instalações propulsoras diferentes para um mesmo navio gaseiro durante um ano de operação, o Propulsão Elétrica foi a que apresentou os melhores resultados e as maiores vantagens em relação ao consumo de combustível. [2]

Figura 7: Consumo de combustível



Fonte: [2]

3.2.2 Redução da tripulação

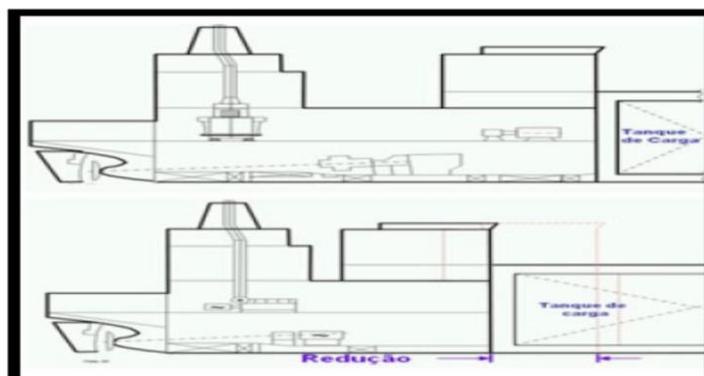
A consequência para os futuros navios elétricos é de uma ampla difusão de sistemas auxiliares e acessórios alimentados por eletricidade, em substituição dos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Sistemas elétricos são mais fáceis de controlar à distância e possuem maior compatibilidade com controles eletrônicos. Essa tendência possibilita o incremento de automação com consequente redução de tripulação, proporcionando benefício através da redução de custo operacional e da exposição do ser humano a potenciais perigos.

3.2.3 Flexibilidade de Projeto

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros. 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. Como consequência dessa 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.

Em navios com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pelo navio será gerada pelos motores principais. Essa diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço. [2]

Figura 8: Distribuição dos equipamentos na Praça de Máquinas



Fonte: [2]

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

3.2.4 Aumento da capacidade de sobrevivência do navio

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

3.2.5 Aumento da vida útil do navio

Na propulsão elétrica, os geradores de bordo alimentam simultaneamente a propulsão, as máquinas auxiliares e, no caso de navios militares, os sistemas de armas, através de um sistema de distribuição redundante e reconfigurável. Os geradores são dimensionados para atender o navio em velocidade máxima, com todos os sistemas vitais em operação. Logo, 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. [2]

3.2.6 Redução dos custos de manutenção

A possibilidade da existência de uma tecnologia comum dentre as diversas plataformas navais, 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 e sistemas, contribuindo para significativas reduções no risco do projeto e maximizando a economia e a logística.

Uma vez que com a adoção desse meio de propulsão 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.

3.2.7 Redução da emissão de poluentes

Hoje em dia, os órgãos ambientais pressionam muito as empresas para que em seus projetos de futuros navios e também os já em funcionamento apresentem uma redução na quantidade de poluentes emitidos. Todos os tipos de poluentes emitidos estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações, como a MARPOL, estão sendo elaboradas com requisitos mais rigorosos. [5]

Com as 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. Portanto, a propulsão elétrica vem sendo bastante indicada, principalmente para navios que operam em países que assinaram o Protocolo de Kyoto. Levando-se em consideração os aspectos ambientais do transporte, a utilização da propulsão elétrica apresenta vantagens em relação à propulsão mecânica, como redução das emissões de gases poluentes oriundos da queima do óleo diesel; menor utilização de insumos que podem gerar resíduos poluidores; e menor emissão de ruídos durante as viagens.

3.2.8 Redução da Assinatura Acústica

Na propulsão elétrica não é necessário haver o alinhamento das máquinas acionadoras principais com as linhas de eixo, tornando desnecessária a utilização de engrenagens redutoras. A eliminação destas contribui para a redução nos níveis de ruído e vibração, garantindo uma significativa diminuição da assinatura acústica do meio, reduzindo conseqüentemente a possibilidade do navio ser detectado, característica muito importante para navios militares. Além disso, motores elétricos apresentam menor nível de ruído irradiado e vibração, devido a sua construção.

4 TIPOS DE MOTOR

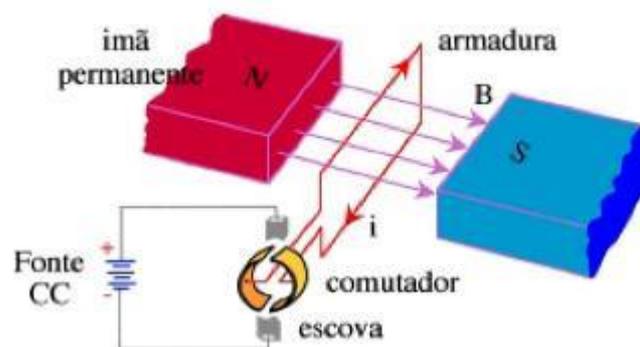
Citaremos agora os principais tipos de motor que podemos encontrar.

4.1 Motor de Corrente Contínua

As primeiras embarcações com motores de Corrente Contínua datam do início do século XX. [4] Esse tipo de motor é composto por duas estruturas magnéticas que consistem em um enrolamento de campo, ou ímã permanente, chamado de estator, e em um enrolamento da armadura, chamado de rotor. O estator é formado por uma estrutura ferromagnética com polos salientes onde são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. O rotor é um eletroímã com um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície. Tal sistema possui um comutador (coletor), que é responsável pela comutação da corrente e dos polos, com lâminas conectadas aos enrolamentos do rotor e as escovas.

Quando a corrente elétrica produz campo magnético, a bobina do rotor se comporta como um ímã permanente e ocorre a atração entre os polos opostos do estator e da bobina, girando o rotor. No momento em que os polos opostos da bobina e do estator se encontram, o sentido da corrente é invertido pelo comutador e consequentemente os polos da bobina se invertem, fazendo com que o rotor se movimente.

Figura 9: Esquema de um motor de ímã permanente



Fonte: [3]

Esse tipo de motor era geralmente do tipo série universal. Nele, os ímãs permanentes do estator eram trocados por eletroímãs conectados no mesmo circuito

do rotor e comutador. A principal diferença entre o motor universal e um motor de ímã permanente é que o primeiro (motor com eletroímãs) pode funcionar tanto em Corrente Contínua quanto em Corrente Alternada.

Esse tipo de motor não podia ser enclausurado como os de Corrente Alternada, do tipo gaiola de esquilo, pois há um grande calor gerado pela comutação escova-coletor que precisa ser dissipado, o que acontecia por meio de ventoinhas. Essa circulação de ar introduz nos campos das máquinas o pó produzido pelo atrito da escova com o comutador, o que gerava uma vulnerabilidade muito alta as baixas de isolamento e resistência nos seus campos, quando encontravam a umidade e a poeira da praça de máquinas. A comutação elétrica entre o comutador e as escovas cria um desgaste na mesma, gerando a necessidade de serem trocadas em curtos espaços de tempo, exigindo uma frequente manutenção, de alto custo e complexidade.

Mesmo com esses problemas, esse tipo de propulsão era amplamente aplicada em rebocadores de alto mar, por sua grande capacidade de variar suavemente sua velocidade na partida, o que era de grande importância nas operações de reboque e especialmente pela questão da manobrabilidade, pois era possível ajustar a velocidade da embarcação de acordo com a necessidade da operação. [4]

4.2 Motor de Corrente Alternada

Os sistemas formados pelos motores de Corrente Alternada fornecem melhores condições que os sistemas com motores de Corrente Contínua, pois apresentam menor custo, são mais leves e de menor tamanho, de fácil manuseio e manutenção mais simples que os motores de Corrente Contínua. Temos essencialmente dois tipos de motores elétricos de Corrente Alternada, os síncronos e os de indução.

Nos motores síncronos, o rotor é um ímã permanente que gira entre dois eletroímãs estacionários. Esses ímãs estacionários são alimentados por Corrente Alternada, logo, seus polos invertem sua polaridade quando a corrente inverte seu sentido. Os polos dos eletroímãs estacionários de mesma polaridade se repelem e atraem os de polaridade oposta. Quando os polos de polaridades opostas se

aproximam, a corrente inverte seu sentido, invertendo a polaridade dos eletroímãs fazendo com que o rotor gire.

Temos motores de Corrente Alternada que possuem rotores que não são nem ímãs permanentes e nem eletroímãs, são feitos de materiais não magnéticos e não tem nenhuma ligação elétrica. Esses motores são chamados de motores de indução. Com o material não magnético exposto a campos magnéticos, correntes fluem por ele fazendo com que o mesmo se torne um rotor magnético através de correntes induzidas. O estator possui um eletroímã aprimorado que é capaz de movimentar o campo magnético que ele mesmo produz. Tais polos magnéticos se deslocam em um círculo e se movimentam em torno do rotor fazendo com que ele se movimente também.

4.2.1 Tipos de partida

As formas mais utilizadas de partida para motor de Corrente Alternada são:

- Partida direta: método de acionamento no qual o motor é conectado diretamente a rede elétrica, ou seja, quando a tensão nominal é aplicada sobre os enrolamentos do estator do motor de maneira direta. Essa é a forma mais simples de partir um motor. Sua principal vantagem é o custo, pois não necessita de nenhum dispositivo de suporte que auxilie na suavização das amplitudes de corrente de partida. Esse tipo de partida obriga ao projetista do sistema elétrico a superdimensionar o sistema de alimentação, disjuntores, fusíveis, que fazem parte do circuito elétrico que alimenta o motor devido a corrente de pico variar de 4 a 12 vezes a nominal;
- Partida estrela-triângulo: método de partida de motores elétricos trifásicos, na qual utiliza uma chave de mesmo nome. Tal chave é interligada aos enrolamentos do motor, que devem estar desmembrados em seis terminais e pode ser manual ou automática. Nesse caso, o motor parte em estrela, que é quando cada enrolamento receberá uma tensão mais baixa que a de projeto nessa ligação. No momento em que o motor vence sua inércia, a chave é atuada, convertendo a configuração para triângulo, aplicando assim a tensão nominal dos enrolamentos. A vantagem desse tipo de partida é o fato

do motor realizar uma partida mais suave, reduzindo a corrente de partida; e

- Partida eletrônica (Soft-starter): consiste em um conjunto de pares de tiristores (SCR) ou combinações de “tiristores”/diodos, para cada fase do motor. O ângulo de disparo de cada par de “tiristores” é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável no motor durante a aceleração. No fim da etapa de partida, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido à transição brusca, como na partida estrela-triângulo. Sua vantagem é que a corrente de partida é mantida próxima a nominal e com suave variação.

4.2.2 Controle de velocidade

Sistemas de variação de velocidade tradicionais empregados em motores de indução usados como dispositivos primários de conversão de energia são mais elaborados que os dos motores de Corrente Contínua, pois quando os motores de Corrente Alternada são ligados diretamente à rede de distribuição de energia elétrica, possuem a característica de velocidade constante.

Para obter a velocidade variável são necessários:

- Variadores mecânicos: utiliza polias e é pouco empregada a bordo;
- Variadores hidráulicos: muito utilizada nos sistemas de governo, mas possui manutenção mais complexa e o inconveniente de vazamentos;
- Variadores eletromagnéticos: usam um sistema de discos acoplados e bobinas quem podem variar seu campo magnético através de técnicas baseadas no princípio das correntes de Foucault, variando o torque e a velocidade na saída do variador;
- Variadores eletrônicos: modificam as características da alimentação elétrica do motor, como os inversores de frequência.

5 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

O expressivo avanço das tecnologias de Eletrônica de Potência foi um dos motivos mais importantes para a ligeira e consistente reintrodução da Propulsão Elétrica no cenário naval mundial. Ela aborda a aplicação de dispositivos semicondutores de potência, como tiristores e transistores, na conversão e no controle da energia elétrica em níveis de potência compatíveis com a propulsão naval. As aplicações dos dispositivos de estado sólido no campo da potência elétrica crescem exponencialmente até hoje já que oferecem alta confiabilidade, pequeno porte, custo baixo, e eficiente controle automático da potência elétrica.

5.1 Chaves semicondutoras de potência

As chaves semicondutoras de potência são os elementos mais importantes em circuitos de Eletrônica de Potência. Os principais tipos de dispositivos semicondutores usados como chaves nestes circuitos são: diodos, transistores de potência de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET), transistores bipolares de porta isolada (IGBT), retificadores controlados de silício (SCR), tiristores bidirecionais de porta controlada (TRIACS), tiristores de desligamento por porta (GTO), e tiristor comutado com porta integrada (IGCT). Cada um desses dispositivos possui sua própria limitação e vantagem característica.

A escolha da chave semicondutora a ser empregada no sistema conversor, para efetuar o controle de velocidade do motor, é realizada através da análise da faixa de potência suportada pelo dispositivo, o tipo de comutação empregada, a frequência de chaveamento, o sistema de controle exigido pelo uso e a eficiência do dispositivo.

Os requisitos adicionais para aplicações navais devido as potências necessárias são tensões de bloqueio elevadas (kV), correntes de condução elevadas (kA), altas frequências de chaveamento (kHz), e reduzidas perdas por chaveamento e condução. Quanto mais alta a frequência de chaveamento é, menor será a demanda por filtros de harmônicos e os circuitos poderão ter peso e volumes reduzidos, característica extremamente importante no nosso meio.

As chaves condutoras mais usadas em conversores de altos níveis de potência (faixa MW) no setor naval são os retificadores controlados de silício (SCR),

os tiristores de desligamento por porta (GTO) e os transistores bipolares de porta isolada (IGBT). [2]

5.1.1 Retificador controlado de silício

O SCR funciona como um diodo, mas possui um terceiro terminal conhecido como gatilho (*Gate* ou *Porta*). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo). Em condições normais de operação, para um SCR conduzir, além de polarizado adequadamente (tensão positiva no ânodo), deve receber sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso. Sua principal aplicação é para conversão e controle de grandes quantidades de potência em sistemas de Corrente Contínua e Corrente Alternada, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Isso se deve à sua ação de chaveamento rápido, ao seu pequeno porte e aos altos valores nominais de corrente e tensão em que podem operar.

Figura 10: SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências



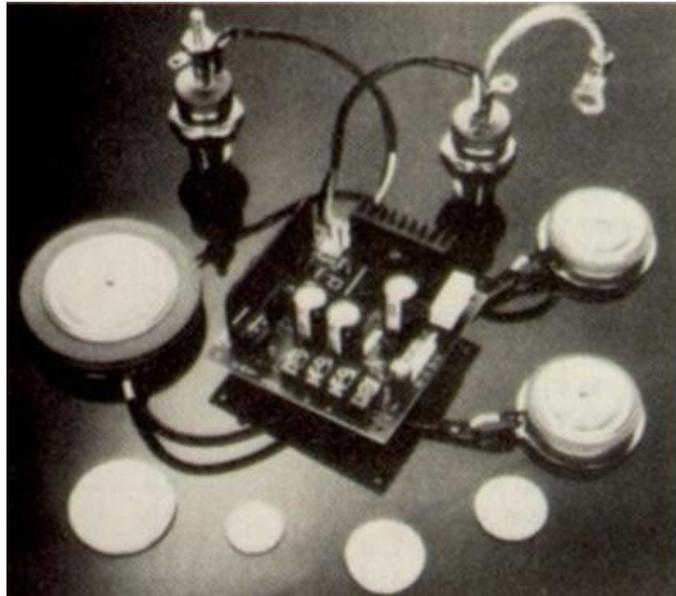
Fonte: [6]

5.1.2 Tiristor de desligamento por porta

O GTO pode ser disparado como um tiristor e bloqueado com um pulso negativo de corrente. Ele opera com comutação forçada, pois seu desligamento ocorre com a aplicação de uma corrente negativa no seu terminal de controle (*Gate*). Esta característica de desligamento é uma vantagem, pois é possível efetuar um

controle do momento de desligamento de forma independente da comutação natural. Entretanto, é necessária a inclusão de circuitos auxiliares e de controle mais complexos, pois a corrente de controle do bloqueio possui valor elevado.

Figura 11: Tiristor de desligamento por porta



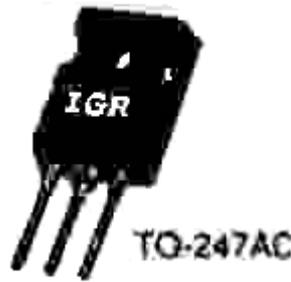
Fonte: [11]

5.1.3 Transistor bipolar de porta isolada

O IGBT é um transistor de potência controlado por tensão. São inerentemente mais rápidos que os transistores bipolares de junção (BJT), mas ainda não tão rápidos quanto os transistores de potência de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET). É um dispositivo bastante avançado em tecnologia e é muito utilizado em aplicações industriais. Dentre suas características temos baixas perdas por condução, quando operam com corrente nominal, operação com correntes e tensões elevadas, podem operar em altas frequências de chaveamento, apresentam circuitos mais simples.

A disponibilidade destes dispositivos eletrônicos tornou viável o desenvolvimento dos conversores de potência para efetuar o efetivo controle de velocidade, através da variação da frequência, de motores elétricos de elevada potência (MW), em Corrente Alternada, e com a garantia de introduzir a menor quantidade possível de harmônicos no sistemas de alimentação e na carga (motor).

Figura 12: Transistor bipolar de porta isolada



Fonte: [13]

5.2 Conversores de frequência

As principais funções dos conversores de frequência para alimentação de motores elétricos são converter a tensão e a corrente elétricas fornecidas pela unidade geradora para os níveis especificados para o determinado motor e efetuar o controle do fluxo de potência da fonte geradora até a carga consumidora (motor elétrico).

Os conversores mais utilizados no setor naval são o cicloconversor, o inversor fonte de corrente (CSI) e o conversor fonte de tensão (VSC).

5.2.1 Cicloconversor

O cicloconversor para aplicações de acionamento de motores síncronos foi utilizado pela primeira vez na década de 1960. Foi o primeiro dispositivo a utilizar a tecnologia da Eletrônica de Potência para fazer a conversão de energia para o controle da rotação ou torque dos motores elétricos de potências elevadas. Ele converte uma tensão e frequência de entrada fixa em grandezas variáveis de saída, em um único estágio de conversão (conversão direta) sem a necessidade da existência de um link de Corrente Contínua.

A maior vantagem encontrada no acionamento com cicloconversor é o seu elevado torque a baixas velocidades (com a ocorrência muito reduzida de torques pulsantes), e também a sua excelente resposta dinâmica. Outras características importantes são a possibilidade de ligações de várias pontes conversoras para obter maiores valores de potência elétrica, e a capacidade de operar mesmo com elevadas sobrecargas.

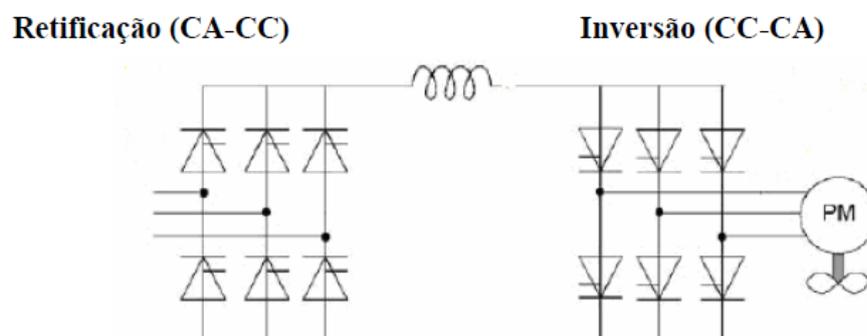
Suas limitações são grandes dimensões, frequência de saída limitada a 30%-40% do valor da frequência da entrada, baixo valor do fator de potência (pois será dependente do valor da velocidade do motor) e um complexo espectro de harmônicos, tanto no lado da fonte como no da carga. [2]

5.2.2 Inversor Fonte de Corrente (CSI)

O inversor fonte de corrente é um conversor de frequência indireto, pois possui dois estágios: uma retificação (CA-CC) e uma inversão (CC-CA). O Inversor Comutado pela Carga (LCI) é um caso particular do inversor fonte de corrente onde a chave controlada utilizada é o tiristor.

A seção retificadora (lado da fonte), composta por tiristores com comutação natural, recebe da fonte de alimentação potência elétrica com frequência constante de 60 Hz e produz uma tensão contínua controlada. Devido à atuação do retificador a tiristores, o valor do fator de potência varia de forma totalmente dependente com a velocidade do motor. Na operação com a velocidade nominal do motor, o fator de potência pode ser alto, mas à medida que a velocidade diminui seu valor decresce até atingir aproximadamente zero. A corrente do lado da fonte contém harmônicos, que geralmente são reduzidos através do emprego de configurações de 12 pulsos. O Navio Transatlântico “Queen Elizabeth II” utiliza esse tipo de inversor.

Figura 13: Inversor Fonte de Corrente (CSI) alimentado por retificador



Fonte: [2]

5.2.3 Conversor Fonte de Tensão (VSC)

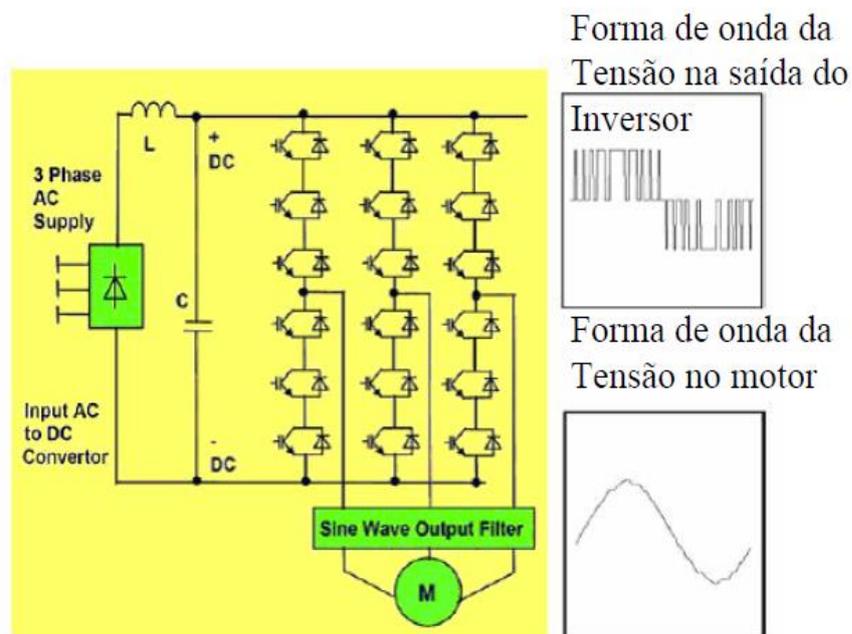
O uso desse tipo de tecnologia vem avançando muito devido:

- Ao aumento da faixa de potência capaz de ser chaveada;

- A disponibilidade de chaves controladas (IGBT, MOSFET, GTO) onde o bloqueio é efetuado por um sinal de controle;
- As melhorias alcançadas na tecnologia de chaveamento e na utilização de micro controladores; e
- A significativa redução nos custos destes conversores.

Esse tipo de conversor, dentre as topologias de sistemas conversores, é a que apresenta o melhor desempenho de acionamento para as mais variadas faixas de velocidade, e atualmente já estão disponíveis inclusive para níveis de média tensão.

Figura 14: Inversor Fonte de Tensão (VSC) alimentado por retificador



Fonte: [2]

O conversor fonte de tensão tem excelente aplicação em navios de pequeno e médio porte de potência de propulsão. Uma das aplicações desta tecnologia é encontrada no Navio “Caballo del Mar”, que possui duas unidades conversoras de 1.430 kW cada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado mostra a importância do desenvolvimento da Propulsão Elétrica para navios. A grande capacidade de manobra das embarcações que usam esse tipo de propulsão facilitou as operações que os rebocadores, por exemplo, precisam fazer junto as plataformas. A considerável redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, a redução de consumo de combustível e outras vantagens que esse sistema oferece fazem com que cada vez mais os armadores optem por esse tipo de propulsão.

Com o seu desenvolvimento torna-se necessário o aperfeiçoamento das pessoas que irão operar os equipamentos de controle da Propulsão Elétrica, além de um sistema de automação de alta tecnologia. A automação facilitou em muitos o trabalho do responsável pela propulsão que pode controlar o navio através da sala de controle sem a necessidade de estar em campo (praça de máquinas). A Propulsão Elétrica provavelmente se tornará o futuro da propulsão dos navios mercantes.

REFERÊNCIAS

- [1] 7 Seas Vessels. Disponível em: <<http://7seasvessels.com/jupiter-1913-imo-0000000/>> Acesso em 20 de julho de 2015.
- [2] **ALVES, Renata N.** Propulsão Elétrica de Navios. 2007. Dissertação para obtenção do grau de mestre em ciências em engenharia elétrica – COOPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [3] Ebah – A rede social para o compartilhamento acadêmico. Disponível em: <www.ebah.com.br/29062015-2057> Acesso em 29 de junho de 2015.
- [4] **FÉGALO, Renan.** Propulsão Elétrica para Navios Mercantes. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso – EFOMM/CIAGA, Rio de Janeiro.
- [5] **FREIRE, Paulo E. M.; FERREIRA, César L.** Propulsão Elétrica – Histórico e Perspectivas Futuras. In: 20º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2004. Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.
- [6] **JÚNIOR, Romeu C.** Apostila Tiristor SCR – Retificador Controlado de Silício. 2005. Edição Preliminar. Campinas.
- [7] Miottel Museum. Disponível em: <<http://www.miottelcollection.com/index/The+Miottel+Collection%3A+S.S.+Normandie>> Acesso em 21 de junho de 2015.
- [8] Navsource. Disponível em: <<http://www.navsource.org/archives/02/01.htm>> Acesso em 20 de julho de 2015.
- [9] Padre Esteve World. Disponível em: <<http://padresteve.com/2010/02/28/forerunners-of-the-next-generation-the-new-mexico-class-uss-new-mexico-uss-idaho-and-uss-mississippi/>> Acesso em 20 de julho de 2015.
- [10] Portal Naval. Disponível em: <<http://www.portalnaval.com.br/noticia/34832/ge-fornece-sistemas-de-propulsao-para-23-navios-tanque/>> Acesso em 16 de fevereiro de 2015.
- [11] **REIS, Fernando S. dos.** Aula 3: Eletrônica de Potência.
- [12] **SEIXAS, Francisco de.** Aula 1: Eletrônica Industrial. 2013. CIAGA, Rio de Janeiro.
- [13] Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia Eletrônica. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/igtb/Pagina_IGBT.htm> Acesso em 25 de julho de 2015.