

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA – CIAGA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE MÁQUINAS
APMA 02/2016**

CAMILA MARIA PEDROSA

PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA EM EMBARCAÇÕES *OFFSHORE*

**RIO DE JANEIRO
2016**

CAMILA MARIA PEDROSA

PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA EM EMBARCAÇÕES *OFFSHORE*

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

Orientador: **Swammy**

**RIO DE JANEIRO
2016**

CAMILA MARIA PEDROSA

PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA EM EMBARCAÇÕES *OFFSHORE*

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

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador (a): Swammy

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

À minha família, minha base na vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todos os desafios e conquistas em minha vida. Em seguida quero agradecer a minha Mãe, meu esposo e irmãos por me apoiar em todas as circunstâncias. Posteriormente agradeço ao Professor ??? pelas orientações e paciência ao longo do presente trabalho, bem como a todos os professores que foram importantes na minha formação durante o curso de APMA. Não me esquecerei dos amigos de classe, que com risadas e conselhos ajudaram a amenizar as adversidades do caminho e que juntos alcançamos mais um objetivo. E aos meus amigos particulares, companheiros de outras batalhas e aventuras, vocês também foram importante, pois me acompanham há muito tempo e sendo parte de meu sucesso. A todos vocês o meu muito OBRIGADA.

Mas quem vence sem riscos triunfa sem dignidade.
(AUGUSTO CURY)

RESUMO

A propulsão dos navios mercantes vive em contínua evolução. Em especial as embarcações *offshore*, que devido à dinâmica de suas operações, necessitam de um sistema seguro, eficiente e econômico. Acrescente a isso o desejo insaciável dos armadores por redução de custos. A preocupação da comunidade internacional em diminuir a emissão de poluentes e o advento de novas tecnologias, também são fatores que levam ao uso de propulsões alternativas, como a diesel elétrica. O presente trabalho tem como objetivo descrever o funcionamento do sistema de Propulsão Diesel Elétrico de uma embarcação de apoio marítimo, mencionando seus elementos essenciais. Apresentando as vantagens de sua aplicabilidade, baseado em informações de bibliografias técnicas, aliadas a estudos já realizados, bem como a experiência deste autor a bordo.

Palavras-chave: Embarcações *Offshore*. Tecnologias. Propulsão Diesel Elétrica. Vantagens. Aplicabilidade.

ABSTRACT

The propulsion of merchant vessels lives in constant evolution. Especially offshore vessels, which due to the dynamics of their operations, they need a safe, efficient and economic system. Add to that the insatiable lust of shipowners for cost reduction. The concern of the international community in reducing emissions and the advent of new technologies, are also factors that lead to the use of alternative propulsion such as electric diesel. This paper aims to describe the operation of the Diesel Electric Propulsion of a maritime support vessel system, citing its essential elements. Presenting the advantages of its application, based on information from technical bibliographies, combined with previous studies and the experience of this author on board.

Keywords: Offshore Vessels. Diesel Electric Propulsion. Technologies, Advantages. Application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de um sistema de Propulsão Diesel Elétrico	13
Figura 2: Admissão em um motor diesel	15
Figura 3: Compressão em um motor diesel	16
Figura 4: Expansão em um motor diesel	16
Figura 5: Exaustão em um motor diesel	16
Figura 6: Esquema de funcionamento gerador elementar armadura girante	18
Figura 7: Esquema de funcionamento de um gerador elementar armadura fixa	19
Figura 8: Esquema de um transformador	22
Figura 9: Desenho simplificado de circuito interno de um inversor	23
Figura 10: Motor elétrico linha Master WEG.	25
Figura 11: Motor com imas superficiais (esquerda) e com imas internos (direita)	26
Figura 12: Propulsor de passos controlável	27
Figura 13: Azipod	28
Figura 14: Z-Drive	29
Figura 15: L-Drive	29
Figura 16: Planta de propulsão diesel elétrica de um PSV	30

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

MCP – Motor de Combustão Principal

MCA – Motor de Combustão Auxiliar

η – Rendimento

P_{in} – Potência de Entrada

P_{out} – Potência Liberada

P_{losses} – Potência Perdida

MIE – Motor de Injeção Espontânea

PMS – Ponto Morto Superior

PMI – Ponto Morto Inferior f.e.m (ϵ) – Força Eletromotriz

B – Indução do Campo Magnético l – Comprimento do Condutor

v – Velocidade Linear N – Número de Espiras

f – Frequência

p – Número de Polos n – Rotação

QEP – Quadro Elétrico Principal

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

SUMÁRIO

1	INTRODUCAO	11
2	O SISTEMA DE PROPULSAO ELETRICO	12
2.1	Motor diesel	14
2.2	O oficial de máquinas na propulsão diesel elétrica	17
2.3	Geradores	17
2.4	Quadro elétrico principal e barramento principal	20
2.5	Transformador	22
2.6	Inversor de frequência	23
2.6.1	Curva V/f	24
2.6.2	Inversor de frequência escalar	24
2.6.3	Inversor de frequência vetorial	24
2.7	Motor elétrico de propulsão	25
2.8	Propulsores	27
2.8.1	Propulsor passo controlável	27
2.8.2	Pod e Azipod	28
2.8.3	Z-Drive	28
2.8.4	L-Drive	29
3	VANTAGENS DA PROPULSAO DIESEL ELETRICA	30
3.1	Flexibilidade do projeto	30
3.2	Redução no consumo de combustível	31
3.3	Redução nos custos de manutenção	31
3.4	Redução na emissão de poluentes	31
3.5	Diminuição no nível de ruídos	32
4	CONSIDERACOES FINAIS	33
	REFERENCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A história da Marinha Mercante é marcada pela evolução do sistema de propulsão das embarcações. O avanço tecnológico contribuiu imensamente para esse desenvolvimento. Com novas tecnologias têm-se sistemas mais seguros e precisos. Ao olharmos para as embarcações *offshore*, nos últimos dez anos, observaremos que a propulsão diesel elétrica é realidade.

É importante destacar que antes de se tornar presença certa nas embarcações de apoio marítimo houve um longo caminho de estudo e desenvolvimento desta tecnologia. E foi por meados do século XX que essa idéia teve seu início. Segundo Arrington (1998), é considerada como a primeira aplicação de propulsão elétrica na marinha mercante, ainda no mesmo século, a construção e operação de uma pequena lancha movida a baterias para transporte de passageiros na Rússia.

Devido aos contínuos desenvolvimentos da tecnologia dos sistemas de engrenagens de dupla redução, para aplicações no setor marítimo, os preços competitivos e como naquela época a propulsão elétrica ainda possuía algumas deficiências, como maior peso, maior volume e menor eficiência energética, a expansão da aplicabilidade do sistema de propulsão diesel elétrica foi inibida em detrimento da propulsão mecânica convencional.

E assim seguiu até o final do século XX, quando a transmissão mecânica de energia alcançou seu limite tecnológico e de viabilidade econômica. Ainda na década de 1990, avanços na engenharia elétrica e eletrônica proporcionaram a transmissão elétrica de energia mais eficiente e compacta. Com isso, no início dos anos 2000, foi possível o emprego em larga escala da propulsão diesel elétrica em diversos tipos de navios, como transatlânticos, apoio marítimo e tanques.

As buscas por novas alternativas de tecnologia para propulsão diesel elétrica continuam em evolução. Os estudos de melhorias em motores de propulsão, para embarcações *offshore*, se dão na busca por: peso e volume reduzido, formato compacto, resistência ao choque, elevadas faixas de potência gerada para valores específicos de torque e baixos valores de assinatura acústica e eletromagnética.

2 O SISTEMA DE PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICO

No sistema de propulsão mecânico tradicional, tinha-se o motor de combustão principal (MCP) acoplado diretamente ao eixo propulsor da embarcação, e com o auxílio da caixa de engrenagens redutoras era possível dar movimento ao hélice para por em movimento o navio. Com esse sistema de propulsão é necessário à presença de motores de combustão auxiliares (MCA's), diesel geradores, para a geração de energia elétrica demandada pelos diversos equipamentos elétricos e eletrônicos a bordo.

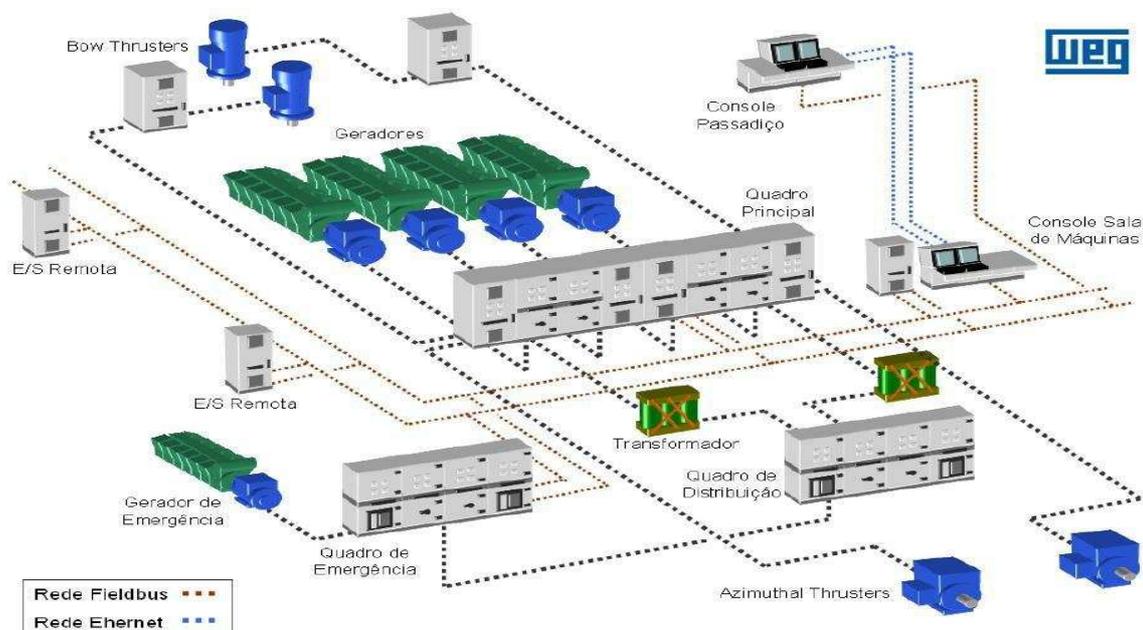
No sistema de propulsão elétrico tem-se a transmissão elétrica de potência de um gerador elétrico, acionado por um dispositivo de acionamento principal (o motor diesel), para um motor elétrico que dará movimento ao propulsor da embarcação. Tendo como principal característica deste sistema que o controle de velocidade do navio é feito pelo controle de rotação do motor elétrico.

A propulsão elétrica consiste basicamente na transmissão elétrica para a mudança entre a relativamente alta velocidade e baixo torque do conjunto diesel gerador para a baixa velocidade e elevado torque requerido no funcionamento dos propulsores, como aponta Alves (2008), McCoy (2002). O que possibilita um melhor controle dos motores elétricos com velocidade variável em uma elevada faixa de potência, além de o sistema ser compacto, confiável e competitivo.

Com isso, ao invés de dois sistemas de potência individuais, cada qual com sua limitação de carga específica, passaram a dispor de uma capacidade de geração única com maior flexibilidade na distribuição de energia elétrica entre as diversas áreas de consumo a bordo. E assim visando à integração entre o sistema de potência da propulsão da embarcação com os sistemas auxiliares.

Assim, a concepção da planta de propulsão diesel elétrica visa alcançar à integração entre o sistema de potência de propulsão da embarcação com os sistemas auxiliares.

Figura 1: Diagrama de um sistema de Propulsão diesel elétrica



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Motor de ímãs permanentes e inversor de frequência WEG.**

Uma vez que já visualizamos o esquema do sistema de propulsão diesel elétrico, podem ser destacados os elementos essenciais que serão desenvolvidos mais adiante: - motor diesel, - gerador elétrico, - barramento principal, - transformador, - conversor de frequência, - motor elétrico e o propulsor.

Em todo sistema de alimentação isolado, a quantidade de energia gerada deve ser igual à energia consumida mais as perdas. Teremos em um sistema de propulsão diesel elétrico, o qual consiste de uma planta de geração de energia elétrica, seu sistema de distribuição e os consumidores, que as perdas energéticas estarão por todo o sistema.

Neste estudo, os motores diesel são os elementos primários e funcionam como fonte de alimentação para o eixo do gerador elétrico. O motor elétrico pode ser o motor de propulsão, que é energizado pelo barramento. As perdas de energia entre o eixo do motor diesel e do eixo do motor elétrico são térmicas e acústicas, levando ao aumento temperatura os equipamentos e ambiente. Através da equação que se segue podemos calcular a eficiência do sistema diesel elétrico apresentado por De Paula (2014):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}}$$

A eficiência elétrica pode ser calculada para cada um dos equipamentos, e os valores de potência (nominal) completo são: 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, têm-se a eficiência de um sistema diesel elétrico, do elemento primário até o motor propulsor, é normalmente $0,88$ e $0,92$ em plena carga. Contudo, a eficiência vai depender da carga do sistema. Então nessa trajetória visualizamos que as perdas são fixas e na ordem de 10% . E que o fator de eficiência energético do sistema vai depender dinamicamente da variação de carga na propulsão.

No sistema de propulsão diesel elétrico a eficiência da transmissão não é tão sensível à variação da velocidade do eixo propulsor, caso observado na transmissão mecânica convencional. Desta forma, quando o navio opera com velocidade mais baixa a eficiência da transmissão elétrica é maior do que a da transmissão mecânica. E associado a isso o fato de que durante inúmeras operações observadas a bordo de embarcações *offshore*, ficou constatado que elas operam aproximadamente 85% do tempo em atividades com baixas velocidades de navegação, chega-se ao entendimento que ratifica a crescente aplicabilidade da propulsão diesel elétrica nos últimos anos em embarcações de apoio marítimo.

2.1 Motor diesel

O motor diesel é o elemento primário em sistemas de propulsão elétrica mais comum nos navios de apoio marítimo de todo o mundo. Aplicado largamente no meio marítimo, o motor de combustão interna do ciclo diesel pode utilizar tanto diesel marítimo quanto óleo pesado, sendo o diesel mais utilizado quando o motor é associado ao gerador. Quando associado ao gerador, o motor trabalha em sua rotação ideal possuindo pequena variação de velocidade para evitar oscilações de frequência da rede elétrica, com isso prolongando a vida útil do motor.

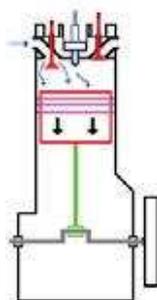
Criado por Rudolph Diesel, o motor de ciclo diesel funcionava com carvão pulverizado como combustível. “Somente em 1912 outro francês que se chamava L’Orange desenvolveu o motor diesel como conhecemos hoje, isto é, com quatro cilindros (no mínimo); injeção direta de combustível e óleo diesel no lugar de carvão.”¹

Considerado um Motor de Injeção Espontâneo (MIE), o motor diesel funciona sem a necessidade de que haja uma faísca em seu sistema, proveniente do fato do óleo combustível ser injetado nos cilindros a alta pressão, o que leva o óleo a atingir altas temperaturas e conseqüentemente, detonação.

O motor a diesel do ciclo diesel é um motor de quatro tempos, ou seja, para cada ciclo do motor, o processo é dividido em quatro etapas (tempos): Admissão, Compressão, Expansão e Exaustão.

a) Admissão: tem-se a abertura da válvula de admissão e o fechamento da válvula de descarga. O pistão é deslocado do Ponto Morto Superior (PMS) ao Ponto morto Inferior (PMI), admitindo apenas ar para o cilindro.

Figura 2: Admissão em um motor diesel

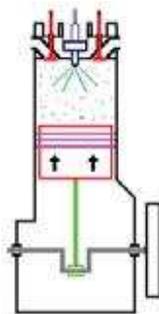


Fonte: FEIJÓO, 2012. (p.25)

b) Compressão: a válvula de admissão é fechada e a válvula de descarga permanece fechada. O pistão é deslocado do PMI ao PMS, comprimindo ar. Antes de o pistão alcançar o PMS, ocorre a injeção do combustível, que se mistura com o ar, aquecendo-se devido à compressão e dando início à combustão.

¹ CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica para Sistemas Automáticos da Produção**. 1ª edição. Editora: Ética, São Paulo, 2007. (p.320)

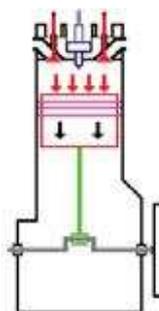
Figura 3: Compressão em um motor diesel



Fonte: FEIJÓO, 2012. (p.25)

c) Expansão: durante a expansão a válvula de admissão e a válvula de descarga permanecem fechadas. A combustão provoca a expansão dos gases que empurram o pistão, fazendo-o se deslocar do PMS ao PMI.

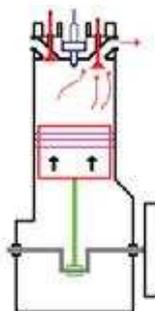
Figura 4: Expansão em um motor diesel



Fonte: FEIJÓO, 2012. (p.26)

d) Exaustão: a válvula de admissão está fechada e a válvula de escape é aberta. O pistão se desloca do PMI ao PMS, empurrando para fora os gases da queima.

Figura 5: Exaustão em um motor diesel



Fonte: FEIJÓO, 2012. (p.26)

Os pistões são acoplados ao sistema biela/manivela que é responsável pela transferência do movimento dos pistões para a rotação do eixo do motor. Consequentemente, acionando a rotação do gerador, que produzirá energia elétrica conforme será apresentado a seguir.

2.2 O oficial de máquinas na propulsão diesel elétrica

O sistema de propulsão diesel elétrico já passou da fase de ser tendência para as embarcações *offshore*, ele é realidade. E para cada novo projeto criado esse sistema passa por uma evolução. Se por um lado ele simplificou o trabalho do oficial de máquinas a bordo, por outro lado exige, do mesmo, mais atenção ao funcionamento da planta, como também o conhecimento mais aprofundado em eletricidade, eletrônica e automação, habilidades estas que estão sendo diferenciadas aos profissionais de máquinas nos últimos anos.

É fato que o oficial de máquinas detém conhecimento básico, obtido em sua formação, que o credencie a operar tal sistema de propulsão. Porém devido à alta tecnologia embarcada, com domínio dos comandos eletroeletrônicos associados à automação, só esse conhecimento básico não é mais suficiente. É preciso saber o que acontece entre o supervisor e o elemento final.

Já é realidade em algumas embarcações de apoio marítimo com sistema diesel elétrico a ausência do eletricista a bordo, fazendo com que a equipe de máquinas do navio fique responsável pela primeira avaliação em caso de falhas de origem elétrica bem como, quando necessário, a intervenção técnica. Ou mesmo quando se tem o eletricista a bordo, é importante que o oficial de máquinas tenha a capacidade de solucionar problemas básicos ou ao menos evoluir neles até a chegada do especialista.

2.3 Geradores

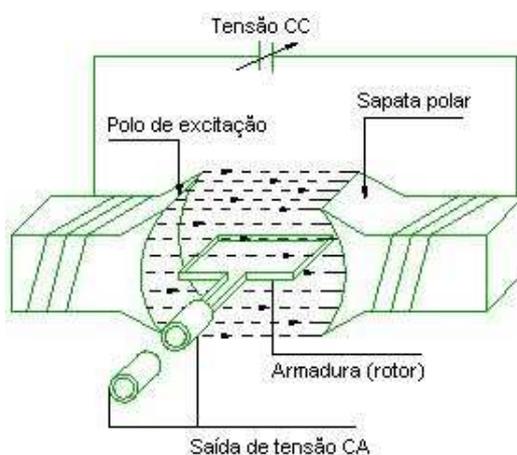
“O gerador elementar foi inventado na Inglaterra em 1831 por MICHAEL FARADAY, e nos Estados Unidos, mais ou menos na mesma época, por JOSEPH HENRY.”²

² WEG. DT-5 – Características e Especificações de Geradores. Manual, TR216-12. Santa Catarina, 2012.

Este gerador consistia basicamente de um ímã que se movimentava dentro de uma espira, ou vice-versa, provocando o aparecimento de uma Força Eletromotriz (f.e.m.) registrado num galvanômetro.

Basicamente um gerador elétrico e o equipamento capaz de transformar energia mecânica, nesse caso proveniente do motor a diesel, em energia elétrica. O princípio básico de funcionamento está baseado no movimento relativo entre uma espira e um campo magnético. Os terminais da espira são conectados a dois anéis, que estão ligados ao circuito externo através de escovas. Este tipo de gerador é denominado de armadura giratória.

Figura 6: Esquema de funcionamento gerador elementar armadura girante



Fonte: Manual WEG (DT-5). (p.5)

Admitindo que a bobina gira com velocidade uniforme no sentido da flecha dentro do campo magnético “B” também uniforme. Se “V” é a velocidade linear do condutor em relação ao campo magnético, e “ α ” o ângulo entre o vetor velocidade e o campo magnético, segundo a lei da indução de FARADAY, o valor instantâneo da f.e.m. induzida no condutor em movimento de rotação será:

$$\varepsilon = B.l.v.\text{sen}\alpha$$

Onde:

ε – força eletromotriz;

B – indução do campo magnético; l – comprimento de cada condutor;

v – velocidade linear de rotação da espira.

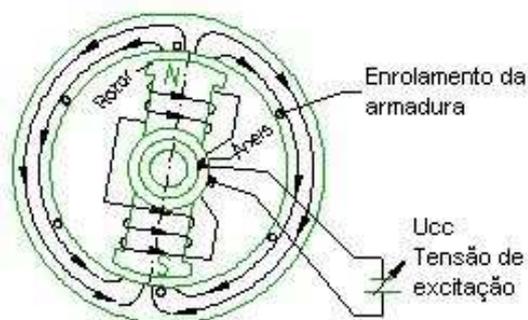
Para N espiras, teremos:

$$\varepsilon = B.l.v.N.\text{sen}$$

A variação da f.e.m. no condutor em função do tempo é determinada pela lei da distribuição da indução magnética sob um polo. Esta distribuição tem um caráter complexo e depende da forma da sapata polar. Com um desenho conveniente da sapata é possível obter uma distribuição senoidal de induções. Neste caso, a f.e.m. induzida no condutor também varia com o tempo sob uma lei senoidal.

Já nos geradores de campo giratório a tensão da armadura é tirada diretamente do enrolamento da armadura (o estator) sem passar pelas escovas. A potência de excitação destes geradores normalmente é inferior a 5% da potência nominal, de acordo com Manual WEG. Por este motivo, o tipo de armadura fixa (campo girante) é o mais utilizado.

Figura 7: Esquema de funcionamento de um gerador elementar armadura fixa



Fonte: Manual WEG (DT-5). (p.5)

Para uma máquina de um par de polos, a cada giro das espiras teremos um ciclo completo da tensão gerada.

Os enrolamentos podem ser construídos com um número maior de pares de polos, que se distribuirão alternadamente (um norte e um sul). Neste caso, tem-se um ciclo a cada par de polos. Assim temos:

$$f = \frac{p \cdot n}{120}$$

Onde:

f – frequência [Hz]; p –
número de polos; n –
rotação [rpm].

2.4 Quadro elétrico principal (QEP) e barramento principal

Foi visto anteriormente que os geradores são responsáveis pela geração de energia elétrica em uma embarcação. Porém não basta só produzir essa energia, é preciso fazer com que ela seja distribuída por toda a embarcação, para que todos os equipamentos elétricos recebam a energia necessária para o correto funcionamento.

Por questão de segurança essa distribuição deve ser de forma organizada e protegida, o QEP foi idealizado para garantir que esse processo seja preciso, controlado e viável.

O QEP apresenta-se basicamente como um armário, com uma estrutura externa metálica e em seu interior é preenchido pelo barramento principal que auxiliado por componentes elétricos efetua o controle da geração e da distribuição de energia, e acionamentos elétricos para motores e alimentação para transformadores, inversores e painéis auxiliares.

Em embarcações *offshore* a tensão de trabalho no barramento principal dentro do QEP é de 690V.

Uma barra é um condutor rígido, em forma de tubo ou de seção perfilada, fornecidos em trechos retilíneos. As barras são usadas diretamente como condutores (geralmente sem isolamento) em equipamentos, tais como quadros de distribuição, ou em ‘barramentos blindados’. (...) Chamamos de barramento o conjunto de barras de mesma tensão nominal, com seus suportes e acessórios. Um barramento blindado é uma linha pré-fabricada cujos condutores são barras.³

Construído geralmente na parte superior interna do QEP, é a partir do barramento principal que todos os equipamentos necessários para a proteção de circuitos estão instalados para que as ramificações possam ser levadas aos equipamentos alimentados.

O barramento pode ser construído de cobre ou de alumínio. E de acordo com COTRIM (1992), é possível comparar a utilização de cobre ou alumínio como condutores como se segue:

³ COTIM, Ademaro. **Instalações Elétricas**. 3ª edição. Editora: Makron Books, São Paulo, 1992. (p.887)

- a) Condutividade: o alumínio apresenta uma condutividade de cerca de 60% da do cobre. Assim, para uma dada capacidade de condução de corrente, é necessário usar um condutor de alumínio com seção nominal da ordem de 1.6 vezes maior do que a indicada, caso fosse utilizado condutor de cobre.
- b) Oxidação: quando exposta ao ar, a superfície do alumínio fica recoberta por uma camada invisível de óxido, de características altamente isolantes e de difícil remoção. Nas conexões com alumínio, um bom só será conseguido com a ruptura dessa camada. Com efeito, a principal finalidade dos conectores utilizados, de pressão e aparafusados, é a de romper o filme de óxido. Muitas vezes são usados, durante a preparação de uma conexão, compostos que inibem a formação de uma nova camada de óxido, uma vez que removida a camada inicial.
- c) Escoamento: por ser mais mole que o cobre, o alumínio escoam com pequenas pressões. Por essa razão, os condutores de alumínio devem ter as superfícies de contato com área suficiente para distribuir as tensões e evitar os danos à parte do condutor a ser comprimida. Por outro lado, é indispensável o reaperto periódico dos conectores afrouxados pelo escoamento, para evitar a formação de óxido e o conseqüente aquecimento das conexões.
- d) Eletropositividade: o alumínio e o cobre estão separados eletroquimicamente por 2 volts. Essa diferença de potencial é responsável pela predisposição de uma conexão cobre - alumínio (ou liga de cobre – liga de alumínio) à corrosão galvânica. Cuidados especiais, como a utilização de conectores especiais, devem ser tomados para evitar a ocorrência de tal corrosão.

Pelas informações apresentadas chega-se ao seguinte raciocínio:

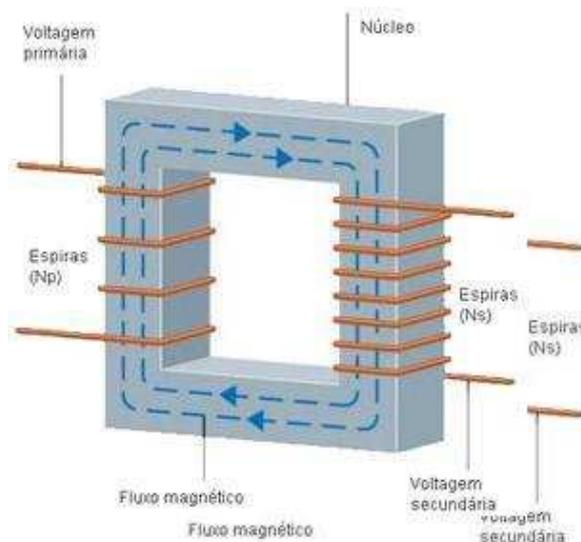
O alumínio representa a solução ideal para linhas de transmissão e de distribuição (cabos nus), tendo em vista, principalmente, a relação condutividade/peso.

Em instalações onde as linhas possuam muitas conexões, onde não haja manutenção periódica e/ou onde sejam utilizados componentes com contatos em liga de cobre (interruptores, tomadas de corrente etc.), via de regra, os condutores de cobre (condutores e/ou cabos isolados) são os mais recomendados. O que é visto na prática em embarcações *offshore*.

2.5 Transformador

Idealizado por Michael Faraday em 1831, o transformador funciona por meio do acoplamento eletromagnético entre dois enrolamentos. É constituído por um enrolamento primário que recebe energia elétrica em determinada tensão e corrente, e um enrolamento secundário pela qual esta energia, com tensão e correntes, é transferida a uma carga. O meio magnético que acopla os enrolamentos primário e secundário pode ser o ar ou um material ferromagnético para melhorar o acoplamento. Quando o enrolamento primário é submetido a uma tensão, um campo magnético é produzido pelo núcleo até o enrolamento secundário, onde é gerada uma tensão proporcional ao número de espiras que este possui.

Figura 8: Esquema de um transformador



Fonte: <http://www.mundoeducacao.com/fisica/o-transformador-tensao-1.htm> Acesso em 18/09/2015.

No sistema de propulsão elétrica integrada, os transformadores apresentam potências que variam muito, devido a grande diversidade de aplicações na planta elétrica. A bordo existem dois tipos mais comuns: o transformador de distribuição, para alimentar os sistemas elétricos auxiliares de bordo e o transformador para os motores de propulsão. Nas embarcações *offshore*, apesar de a rede elétrica ser trifásica, os transformadores costumam ser monofásicos, o que permite em caso de avaria em algum dos transformadores que não se perca toda a rede elétrica.

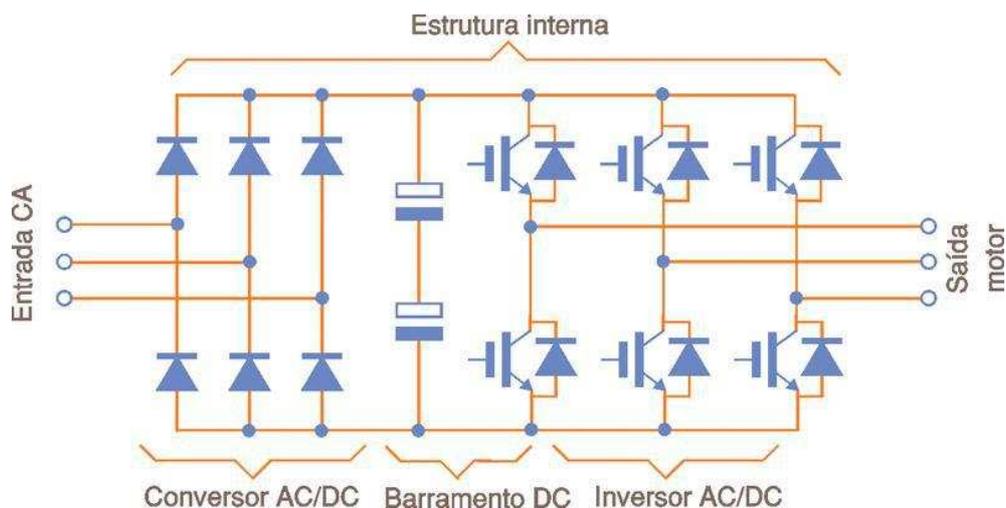
2.6 Inversor de frequência

O inversor de frequência, também conhecido como conversor de frequência permite o controle da velocidade em motores de indução, substituindo os motores de corrente contínua, por meio da variação de frequência e torque, através da variação de tensão. Nas embarcações o inversor de frequência é usado para o controle de motores de propulsão, bombas de carga, entre outros.

Os cicloconversores antecederam os atuais inversores. Aqueles convertiam 60 Hz da rede em frequência mais baixa, era uma conversão de corrente alternada em corrente alternada. Enquanto que os inversores realizam a conversão de corrente alternada em corrente contínua e novamente em corrente alternada.

Os inversores são divididos em duas seções básicas: a seção retificadora e a seção inversora. Na seção retificadora tem-se que a tensão alternada de entrada é transformada pelo retificador em contínua pulsada e um capacitor transforma a tensão contínua pulsada em contínua pura. Na seção inversora, a tensão retificada é novamente transformada em tensão alternada por meio de transistores *IGBT*. Estes transistores chaveiam várias vezes por ciclo, gerando um trem de pulsos com largura variável senoidal. Esta tensão de saída, aplicada a um motor elétrico, irá gerar uma forma de onda corrente bem próxima da senoidal através do enrolamento do motor.

Figura 9: Desenho simplificado do circuito interno de um inversor



Fonte: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/956-como-trabalhar-a-curva-v-hz-no-inversor-de-frequncia> Acesso em 18/09/2015.

2.6.1 Curva V/f

O inversor de frequência varia a velocidade de motores elétricos alterando a frequência, mas para isso é preciso alterar seu torque em diversas rotações. Semelhante aos motores diesel, para obter velocidades menores é preciso mais torque e para velocidades mais altas de menos torque.

Através da tensão de alimentação do motor elétrico que são feito a alteração e o controle do torque. Com diversos valores de tensões de alimentação pode-se manter a mesma frequência e com isso obter-se a relação V/f. A qual deverá ser mantida de forma a garantir ao motor um comportamento adequado atendendo à velocidade requisitada.

Essa garantia é muito importante quando se trata da propulsão da embarcação, pois devido ao seu movimento sobre as ondas, os hélices do navio por diversas vezes saem da água, fazendo com que a carga sobre o motor varie bruscamente. Caso contrário, essa variação de carga poderia forçar demais o motor, causando a perda do mesmo.

É possível parametrizar o valor V/f em um motor ou controlá-lo por computador, fazendo com que o motor consiga manter seu rendimento elevado em qualquer faixa de velocidade. O controle de frequência consegue alterar a tensão de saída pela modulação por largura de pulso. Aumentada a tensão, os pulsos são “alargados”. E quando abaixada a tensão, os pulsos são “estreitados”. O inversor de frequência tem como controlar esta curva de duas formas, é o que diferenciam os inversores de frequência escalares e os vetoriais.

2.6.2 Inversor de frequência escalar

Neste tipo de inversor, a parametrização da curva V/f é feita manualmente, assim, o operador toma como base o regime de trabalho no qual o inversor deverá operar e define seus parâmetros. Mas, quando em baixas rotações, o sistema não consegue bom torque devido ao próprio rendimento do motor.

2.6.3 Inversor de frequência vetorial

O inversor de frequência vetorial foi desenvolvido para sanar os problemas do inversor escalar. A principal diferença é que nele a curva V/f não é parametrizada pelo operador, mais sim

pelo próprio equipamento que ajusta esta curva a cada milissegundo para otimizar o torque e, conseqüentemente, o rendimento do motor elétrico de propulsão. Este inversor utiliza corrente de magnetização e retórica do motor para configurar a curva V/f.

2.7 Motor elétrico de propulsão

Figura 10: Motor elétrico linha máster WEG



Fonte: <http://www.ergmotoreselétricos.com.br/motores-eletricos-weg/industriais-alta-baixa-tensao/motor-linha-master-mga-bt-at-odp-aberto-gaiola-weg.php> Acesso em 19/09/2015.

É o motor de propulsão que fornece potência ao hélice do propulsor. No sistema de propulsão elétrica, é ele que faz o papel de máquina propulsora e toda a vantagem e eficiência deste tipo de propulsão gira em torno dele. É nele onde a energia elétrica é transformada em energia mecânica. De acordo com sua aplicação, podem ser de dois tipos: o motor assíncrono e o motor síncrono.

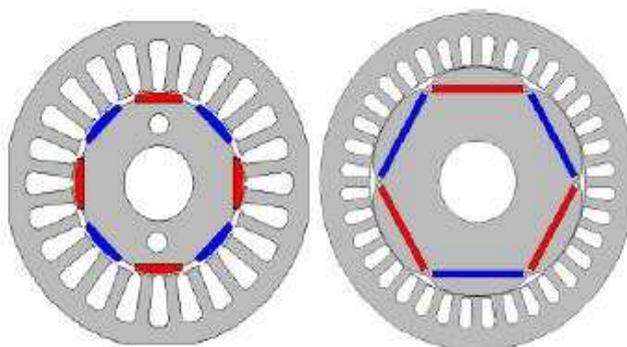
Os motores assíncronos, apesar de larga aplicação no campo da indústria devido à sua robustez e à facilidade de manutenção e construção, somente são empregados em instalações de baixa potência.

Enquanto que os motores síncronos são mais utilizados devido à eficiência em altas demandas de potência. Por sua máquina possuir rotação igual ao campo de oscilação que o induz, que ele é chamado de síncrono. Precisando de um excitador para funcionar corretamente, tornando sua construção complicada. O excitador recebe corrente de um sistema composto por inversor e transformador de excitação.

O motor síncrono a imã permanente (*permanent magnetic synchronous motor* – PMSM) possui imã permanente no seu rotor, é o tipo de motor que está sendo mais utilizado para fins de propulsão naval, possui alto rendimento, baixo volume e peso, baixo nível de vibração e ruído, torque suave, ampla faixa de rotação a torque constante. Sendo de dois tipos: os de ímãs internos ou pólos salientes e os com ímãs superficiais ou pólos lisos.

Os motores de ímãs internos ou pólos saliente possuem ímãs montados internamente no rotor. Devido à geometria do rotor, este tende a produzir saliências e indutâncias do eixo direto e quadratura diferentes. A saliência produz torque de relutância que, somado ao torque eletromagnético devido aos ímãs, produz um maior torque resultante. Os motores de ímãs internos são capazes de funcionar em uma grande faixa de velocidade acima da nominal, com potência constante.

Figura 11: Motor com ímãs superficiais (esquerda) e com Ímãs internos (direita)



Fonte: <http://www.imas-neodimio.com/news/MOTOR-COM-M-SUPERFICIAIS-E-INTERNOS-BRUSHLESS-AC-56.html> Acesso em 19/09/2015.

Os motores com ímãs superficiais ou de pólos lisos, apresentam as indutâncias do eixo direto e quadratura são praticamente iguais e constantes, apresentam limitada capacidade de operarem em velocidades acima da nominal e com potência constante, devido à baixa indutância resultante do grande entreferro.

2.8 Propulsores

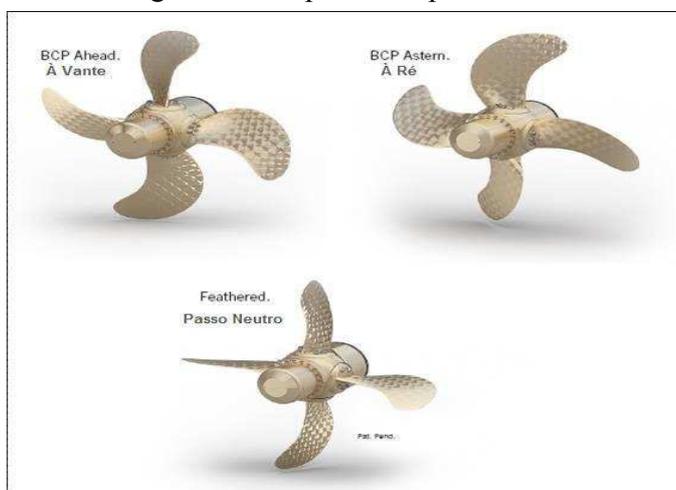
A função de um propulsor é gerar uma força propulsiva (*thrust*). Que surge da variação da quantidade de movimento do fluido. Ou seja, o propulsor exerce uma força sobre o fluido e o fluido exerce uma força de reação de mesma magnitude e direção contrária sobre o propulsor. E assim dando movimento ao navio. Toda embarcação *offshore* necessita de um propulsor adequado para a operação que a mesma irá executar. A seguir serão apresentados os tipos de propulsores mais empregados nas embarcações de apoio marítimo.

2.8.1 Propulsor de passo controlável

Desenvolvido para facilitar a manobra de inversão do sentido de movimento da embarcação, necessitando apenas adaptar o passo do hélice de acordo com o desejado ao invés de inverter a rotação do eixo. No propulsor de passo controlável as pás giram em um único sentido descartando a necessidade de caixa de reversão, comum no sistema de passo fixo para inverter o movimento.

Como opera com sentido e rotação constantes, este propulsor uma redução no consumo de carga elétrica e conseqüentemente no consumo de combustível. O sistema de passo controlável incorpora tecnologia de resposta rápida com nível de ruídos e vibrações próximo do limite zero. Apresenta a seu favor o fato de ser extremamente robusto e preparado para operar em condições adversas de mar com baixo custo de manutenção.

Figura 12: Propulsor de passo controlável

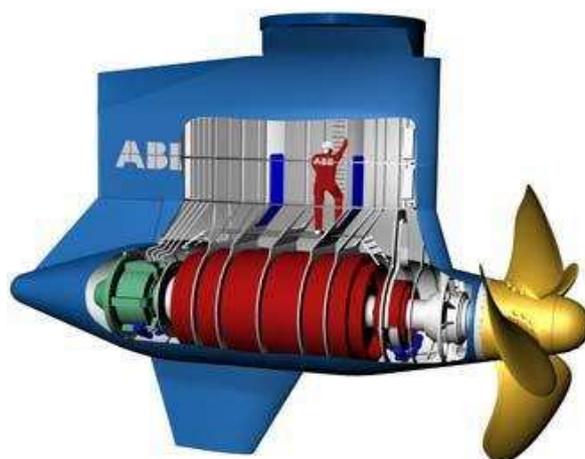


Fonte: <http://fis.com/fis/tradingmarket/photos/39960.918125.jpg> Acesso em 19/09/2054.

2.8.2 Pod e Azipod

É o sistema no qual o motor elétrico de propulsão está instalado dentro do *POD* (*podded drive*) e, portanto, dentro da água, que aciona diretamente o hélice propulsor sendo capaz entregar o torque total inclusive nas baixas rotações, tendo capacidade de rotação em 360° do azimute. Dependendo de sua aplicação, os motores de propulsão podem ser síncronos ou assíncronos. Possui ótima capacidade de mudança rápida de direção do empuxo do hélice, bem como grande capacidade de manobra em qualquer direção.

Figura 13: *Azipod*



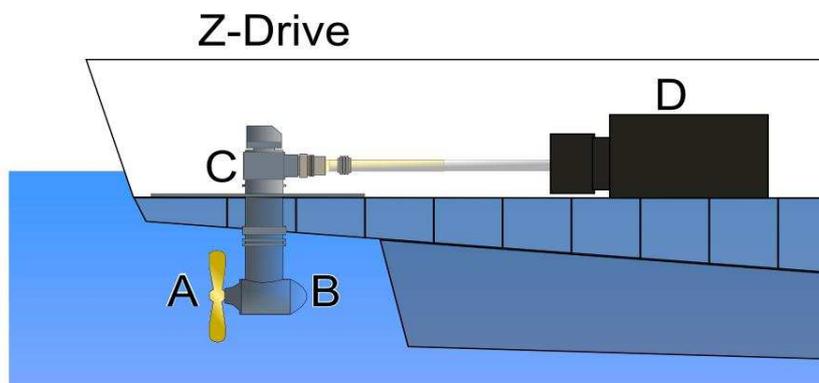
Fonte: <http://www.hightechfinland.com/direct.aspx?area=htf&prm1=889&prm2=article>. Acesso em 19/09/2015.

2.8.3 *Z-drive*

É um propulsor azimutal, pois pode girar 360°, dessa forma permitindo mudanças rápidas na direção do impulso e, assim, na direção da embarcação, o que elimina a necessidade de governo por meio de leme convencional. O motor é montado na posição horizontal dentro do navio, próximo à unidade. É chamada de *Z-drive*, porque o movimento de rotação tem que fazer duas voltas em ângulo reto, assemelhando-se a letra “Z”. Sua desvantagem é possuir duas “*gearbox*”, causando perdas.

Na figura a seguir tem-se a representação da transmissão *Z-drive*, onde D é o motor elétrico, C e B são as caixas de engrenagens e A é o hélice propulsor.

Figura 14: Z-Drive



Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Z-drive> Acesso em 19/09/2015.

2.8.4 L-drive

É um tipo de propulsor azimutal constituído por um motor elétrico montado na vertical na parte interna do navio. O *Pod* pode girar em 360°, permitindo mudanças rápidas na direção da propulsão, o que elimina a necessidade do leme convencional. Este modelo é chamado de *L-drive*, pois o movimento de rotação tem de fazer um ângulo reto, assemelhando-se a letra “L”. Por possuir apenas uma “*gearbox*”, o que diminui as perdas, se torna mais vantajoso do que o modelo *Z-drive*.

Figura15: L-Drive



Fonte: <http://www.nauticexpo.com/prod/masson-marine/product-27412-320206.html>. Acessado em 19/09/2015.

3 VANTAGENS DA PROPULSÃO DIESEL ELÉTRICA

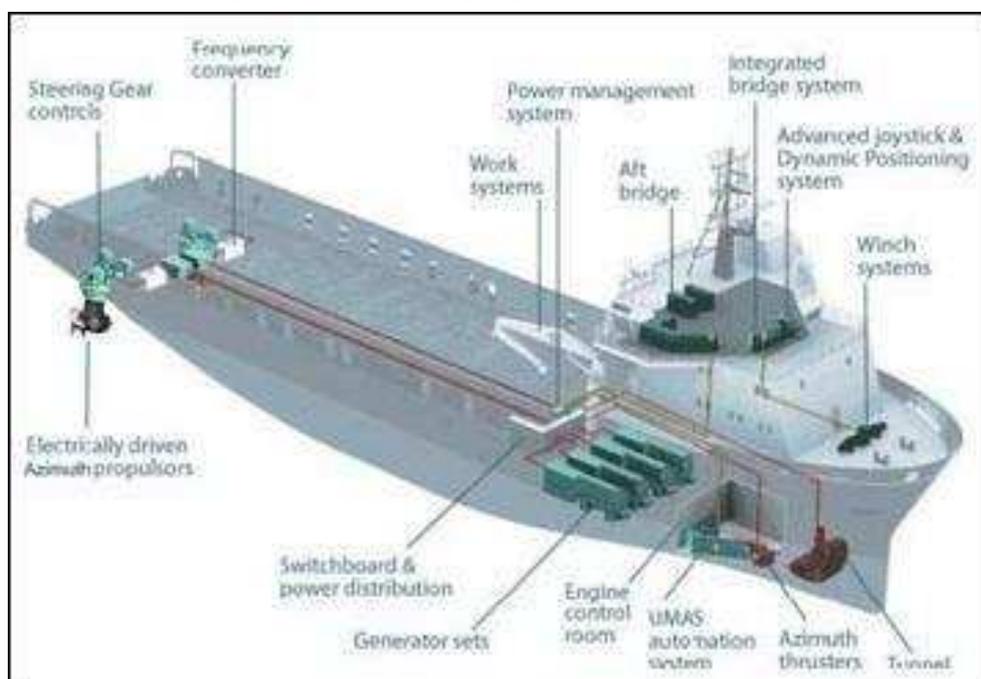
3.1 Flexibilidade do projeto

Na planta de propulsão diesel elétrica os equipamentos são modulares, assim não precisam ser posicionados próximos uns aos outros. Nas embarcações *offshore* eles costumam ser instalados em compartimentos diferentes. E dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas nas proximidades do Centro de Controle de Máquinas (CCM), deixando apenas o motor elétrico e seus acessórios conectados ao propulsor na proa.

Com esta flexibilização, não há mais a necessidade de concentrar os equipamentos em praça de máquinas principais, sendo possível espalhar os equipamentos em compartimentos de máquinas pelo navio, em áreas menos críticas, otimizando o aproveitamento do espaço disponível a bordo, como menciona Alves (2008).

Como o sistema de propulsão elétrica não necessita de motores auxiliares toda a energia requerida pela embarcação será gerada pelos motores principais. Desta forma a diminuição da quantidade de motores provocará também a redução de custos e economia de espaços.

Figura 16: Planta de propulsão diesel elétrica de um *PSV*



Fonte: http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2014/Alex+Aloisio/relat1/Texto.htm. Acessado em 27/09/2016.

3.2 Redução do consumo de combustível

Nas embarcações dotadas de propulsão mecânica, tem-se que a velocidade do motor principal define a rotação do eixo propulsão e conseqüentemente do próprio hélice. E ainda, se o mesmo não for de passo controlável, isso levará o motor a sofrer variações bruscas em sua rotação de trabalho, ocasionando desperdício de combustível além de seu desgaste excessivo.

Nas plantas de propulsão diesel elétricas esse problema é minimizado, uma vez que os motores diesel estão associados aos geradores e não mais aos hélices, fazendo os primeiros trabalharem na faixa de ótimo desempenho.

Assim com a eliminação da relação direta entre as rotações do motor diesel e a velocidade do propulsor pela propulsão elétrica, tem-se as reduções significativas do consumo de combustível e de perda de potência.

Ainda conforme levantamento feito por Alves (2008) estima-se que a propulsão diesel elétrica tenha eficiência energética 17% maior comparado com a propulsão mecânica convencional.

3.3 Redução dos custos de manutenção

Com a adoção da Propulsão diesel elétrica os motores auxiliares não são mais necessários, reduzindo a quantidade de equipamentos instalados e assim resultando na diminuição dos custos de manutenção. Junto a isso, deve-se associar o fato de os equipamentos elétricos apresentarem custos e períodos menores de manutenção que somados à elevada automação dos sistemas elétricos fazem com que as manutenções preditiva e preventiva sejam ferramentas eficazes para a redução dos custos de manutenção, como apontado por Norato (2013).

3.4 Redução da emissão de poluentes

Atualmente há uma pressão dos órgãos ambientais para que as empresas apresentem uma redução na quantidade de poluentes emitidos por suas embarcações. Os poluentes emitidos (gasosos, líquidos, sólidos) estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações elaboradas com requisitos mais rigorosos.

Através de acordos e tratados 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 diesel elétrica é fortemente indicada.

Durante as operações, devem-se levar em consideração os aspectos ambientais do transporte. Assim, o emprego da propulsão diesel elétrica apresenta vantagens em relação à propulsão mecânica, como:

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

No estudo realizado por Pereira (2006), é evidenciado que a propulsão diesel elétrica gera menos gases poluentes que os sistemas convencionais devido ao fato do motor diesel opera constantemente no ponto ótimo de projeto, proporcionando redução no consumo de combustível e consequente diminuição na liberação de gases poluentes (ex: dióxido de carbono, óxido de nitrogênio e óxido de enxofre) durante as operações.

Projeta-se para o futuro que não somente os poluentes emitidos durante a vida operativa da embarcação serão controlados, como também todos aqueles produzidos durante a sua construção até o encerramento do período operativo. É uma nova filosofia, que apesar da dificuldade de aplicação prática, vem ganhando força nos últimos anos, devido às atitudes políticas de interesse mundial, como menciona Newell (2000).

3.5 Diminuição do nível de ruídos

Nas embarcações com propulsão diesel elétrica não são mais necessários o alinhamento dos motores principais com as linhas de eixo, tornando, desnecessário o uso de engrenagens redutoras. A retirada desta engrenagem contribuiu imensamente para a redução nos níveis de ruído e vibração, garantindo assim significativa diminuição da assinatura acústica na praça de máquinas, de acordo com Freire (2004). Como também, ao fato dos motores elétricos apresentarem menor nível de ruído irradiado, devido às suas características construtivas, logo, não produzindo tanta vibração e ruído quanto os equipamentos mecânicos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos desafios da comunidade marítima é a busca por alternativas de energia sustentável que possuam maior eficiência energética com menor consumo de combustível e que reduza a emissão de poluentes.

O presente trabalho teve como objetivo a apresentação do sistema de propulsão diesel elétrico nas embarcações *offshore* e os elementos essenciais que o compõem. Foi possível demonstrar o princípio de funcionamento e a respectiva função de cada equipamento na planta. E posteriormente apresentado às vantagens que a aplicabilidade deste sistema proporciona para a embarcação, o armador, o meio ambiente e a tripulação. Bem como orientações importantes aos oficiais de máquinas que irão operar com a planta diesel elétrica para trabalharem de forma segura e eficiente.

Desta forma podemos ratificar o emprego do sistema de propulsão diesel elétrico no mercado *offshore*, nos últimos, e que se tornará ainda mais presente nas embarcações por ser uma forma energética eficiente e limpa. Conclui-se, portanto que o objetivo deste trabalho foi alcançado, mas que o mesmo não esgota o estudo sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Renata Nunes. **Propulsão elétrica de navios**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- CAPELLI, Alexandre. **Energia elétrica para sistemas automáticos da produção**. 1ª edição. Editora: Ética, São Paulo, 2007.
- COTRIM, Ademaro. **Instalações elétricas**. 3ª edição. Editora: Makron Books, São Paulo, 1992.
- DE PAULA, Leonardo Morrison. **A avaliação do sistema de propulsão diesel elétrico em Embarcações de Apoio Marítimo**. Monografia para conclusão do Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas. CIAGA, Rio de Janeiro, 2014.
- DILÉO, Bruna Gallipoli. **Sistemas de propulsão elétrica**. Monografia para conclusão da graduação em máquinas na Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante. CIAGA, Rio de Janeiro, 2013.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. 4ª Ed. Editora Érica Ltda, São Paulo, 2011.
- FEIJÓO, Gabriel Coelho. **Estudo do sistema elétrico em embarcações marítimas com propulsão diesel elétrica**. Monografia para conclusão da graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2012.
- FREIRE, P., R., M., Ferreira, C., L. **Propulsão elétrica – histórico e perspectivas futuras**. 20º Congresso Nacional de Transporte Marítimo, Construção Naval e *Offshore* – EXPONAVAL 2004. Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.
- MCCOY, T., J. **Trends in ship electric propulsion**. Power Engineering Society Summer Meeting. 2002, Vol. 1, pp. 343-346, IEEE.
- NEWELL, J., M., Young, S., S. **Beyond electric ship**. Transactions IMarE, vol. 112. 2000.
- PEREIRA, N., N., Brinati, H., L. **Estudo do impacto da propulsão diesel elétrica na emissão de gases poluentes**. 22º Congresso Nacional de Transporte Marítimo, Construção Naval e *Offshore* – EXPONAVAL 2006. Sociedade Brasileira de Engenharia Naval –SOBENA.
- WEG. **DT-5 Características e especificações de geradores**. (Manual TR216-12). Santa Catarina, 2012.