

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

KÁSSYO BORGES DE LUCENA
LEONARDO MORANDINI BIANCHI

A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA

RIO DE JANEIRO

2017

KÁSSYO BORGES DE LUCENA
LEONARDO MORANDINI BIANCHI

A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA

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

2017

KÁSSYO BORGES DE LUCENA
LEONARDO MORANDINI BIANCHI

A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA

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.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: MSc Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível. Obrigado Senhor, por estar presente e nos fazer acreditar que “Deus ajuda a quem se dedica”.

Somos gratos ao nosso orientador mestre Paulo Pinto, pelo exemplo de profissionalismo e dedicação ao desenvolvimento de seus alunos.

Queremos agradecer também às nossas famílias, que sempre foram nossas fortalezas, nossa base como educadores para que pudéssemos chegar a este momento importante.

Aos nossos amores, agradecemos pela paciência e pela atenção nos dias de dificuldade e pelos sorrisos e abraços nos dias de alegria.

RESUMO

Este trabalho visa apresentar a utilização da propulsão elétrica, o espaço conquistado no mercado a cada dia e mostrar também, que essa tecnologia não é tão atual quanto muitos acreditam, data do século XIX esse progresso constante na admissão da propulsão elétrica no mercado. Este trabalho buscará documentar a evolução deste tipo de propulsão inicialmente adotada em projetos de quebra-gelos e navios especializados e que hoje alcança novos mercados, a partir de uma perspectiva histórica inicialmente.

Em se tratando de propulsão elétrica, uma visão geral sobre os conversores utilizados será colocada à disposição, sobretudo relatando seus princípios de funcionamento, bem como listaremos as principais vantagens e desvantagens da propulsão elétrica em relação a propulsão mecânica.

Assim, uma perspectiva futura será traçada em cima de novas possibilidades e a disposição do mercado atual, novas tecnologias e interesse econômico da indústria marítima.

Palavras-chave: Marinha Mercante. Propulsão elétrica. Evolução da propulsão.

ABSTRACT

This work aims to present the use of electric propulsion, the space conquered in the market every day and also show that this technology is not as current as many believe, dates from the nineteenth century that steady progress in the admission of electric propulsion in the market. This work will seek to document the evolution of this type of propulsion initially adopted in icebreaker projects and specialized vessels and that now reaches new markets, starting from an historical perspective initially.

In the case of electric propulsion, an overview of the converters used will be made available, mainly relating their principles of operation, as well as list the main advantages and disadvantages of electric propulsion in relation to mechanical propulsion.

Thus, a future perspective will be drawn upon new possibilities and the current market layout, new technologies and economic interest of the maritime industry.

Keywords: Merchant Navy. Electric propulsion. Evolution of propulsion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	USS “Júpiter”	10
Figura 2 -	USS “Langley” sendo convertido	11
Figura 3 -	Vista aérea do USS “Langley”	12
Figura 4 -	USS “New México”	13
Figura 5 -	Rotor “Gaiola de Esquilo”	14
Figura 6 -	USS “Lexington”	14
Figura 7 -	USS “Saratoga”	15
Figura 8 -	SS “Normandie”	16
Figura 9 -	Consumo de Combustível	19
Figura 10 -	Distribuição dos equipamentos na Praça de Máquinas	20
Figura 11 -	Emissão de gases poluentes	22
Figura 12 -	Sistema de acionamento elétrico	23
Figura 13 -	Circuito equivalente monofásico	28
Figura 14 -	Navio Queen Elizabeth II	32
Figura 15 -	Sistema PWM	34
Figura 16 -	“Pods” em Navio de passageiros	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	HISTÓRIA E EVOLUÇÃO	10
2.1	Retrospectiva histórica	10
3	PRINCIPAIS VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA	18
3.1	Redução do consumo de combustível	18
3.2	Redução da tripulação	19
3.3	Flexibilidade do projeto	20
3.4	Aumento da capacidade de sobrevivência do navio	20
3.5	Redução dos custos de manutenção	21
3.6	Redução da emissão de poluentes	21
4	COMPARAÇÃO ENTRE PROPULSORES	23
5	MOTOR DE INDUÇÃO	25
5.1	INTRODUÇÃO	25
5.2	Princípio de funcionamento	26
5.3	O circuito equivalente	27
5.4	O circuito equivalente do motor de indução trifásico	28
5.5	Parâmetros do circuito equivalente	29
5.5.1	resistência do enrolamento do estator por fase (R_1)	29
5.5.2	resistência do enrolamento do rotor refletida ao estator por fase (R'_2)	29
5.5.3	reatância de dispersão do enrolamento do estator por fase (X_1)	29
5.5.4	reatância de dispersão do enrolamento do Rotor refletida ao estator por fase (X'_2)	30
5.5.5	reatância de magnetização por fase (X_m)	30
5.5.6	resistência correspondente às perdas do núcleo magnético por fase (R_{fe})	30
6	A PROPULSÃO ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA	31
6.1	Introdução	31
6.2	O inversor Fonte de Corrente (CSI)	31
6.3	Modulação por largura de pulso	33

6.4	Cicloconversor	34
7	PERSPECTIVA FUTURA	36
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

A utilização da propulsão elétrica ganha mercado a cada dia e essa máxima não é tão atual quanto muitos acreditam, data do século XIX esse progresso constante na admissão da propulsão elétrica no mercado. Este trabalho documenta a evolução deste tipo de propulsão inicialmente adotada em projetos de quebra-gelos e navios especializados e que hoje alcança novos mercados, a partir de uma perspectiva histórica.

Em se tratando de propulsão elétrica, uma visão geral sobre os conversores utilizados é colocada à disposição no capítulo 4, sobretudo relatando seus princípios de funcionamento, assim como listaremos as principais vantagens e desvantagens da propulsão elétrica em relação a propulsão mecânica.

Ao fim, uma perspectiva futura será traçada em cima de novas possibilidades e a disposição do mercado atual, novas tecnologias e interesse econômico da indústria marítima.

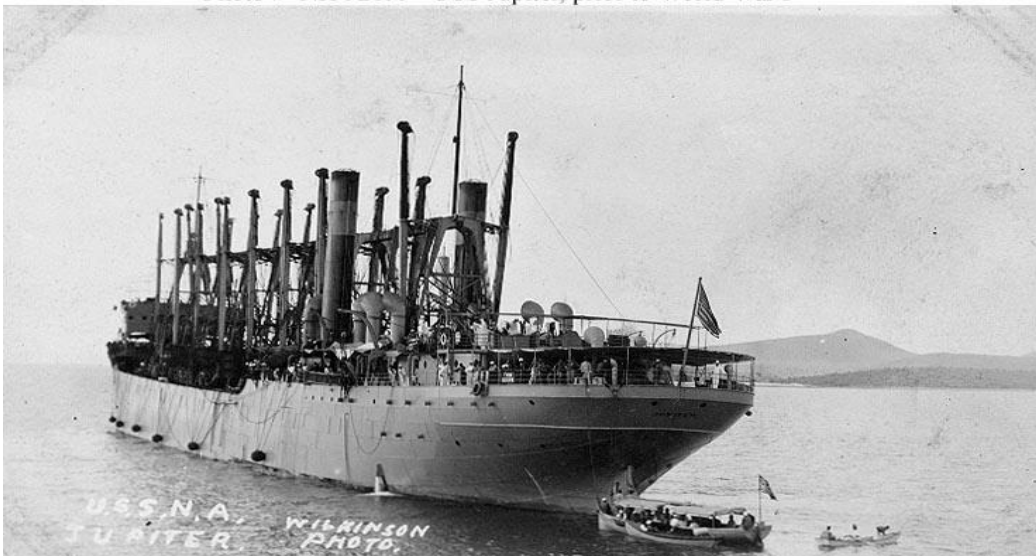
2 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

2.1 Retrospectiva histórica

Muitos pensam que a propulsão elétrica como tecnologia é recente, entretanto podemos constatar que a inovação é datada do século XIX. A primeira constatação foi na Rússia, onde construíram uma lancha para transportar passageiros, de tamanho pequeno e, o mais importante, movida por baterias. Já no século XX, pode-se também citar exemplos de utilização de propulsão elétrica na Marinha dos Estados Unidos da América, agora em navios de grande porte, como o USS "Júpiter", USS "Langley", USS "New México", entre outros que serão abordados mais a fundo.

Figura 1 - USS "Júpiter"

Photo # NH 92199 USS Jupiter, prior to World War I



Fonte: www.ibiblio.org

O USS "Júpiter" era um navio carvoeiro, de 19230 t, de velocidade máxima de 14 nós e dotado de dois eixos, o qual recebeu a implementação de um sistema de propulsão experimental com potência por volta 4.1 MW (por eixo) em 1913. O sistema de propulsão do USS "Júpiter" consistia de um turbo gerador em corrente alternada (CA) que alimentava dois motores de indução com rotor bobinado.

Motores de indução com rotor bobinado e comutadores deslizantes eram utilizados e, para aumentar o torque de partida e para inverter o sentido de rotação dos eixos, duas das três fases dos motores eram invertidas e resistências eram inseridas no circuito do rotor. A velocidade do navio era controlada pela variação da rotação da turbina. A combinação de um gerador de dois pólos com motores de indução de 36 pólos tornou possível uma redução da rotação de 2130 rpm na turbina para 117 rpm nos eixos. (LEAL FERREIRA, 2004, p. 2)

Em 1922, esse mesmo navio foi convertido no primeiro navio aeródromo da Marinha americana, sendo nomeado USS "Langley", sendo amplamente utilizado pelos americanos até o seu afundamento em meio a combates em 1942 . Por ser o primeiro, USS "Langley" teve grande importância, o seu sucesso abriu caminho para que mais navios fossem concebidos com propulsão elétrica.

Figura 2 - USS "Langley" sendo convertido.

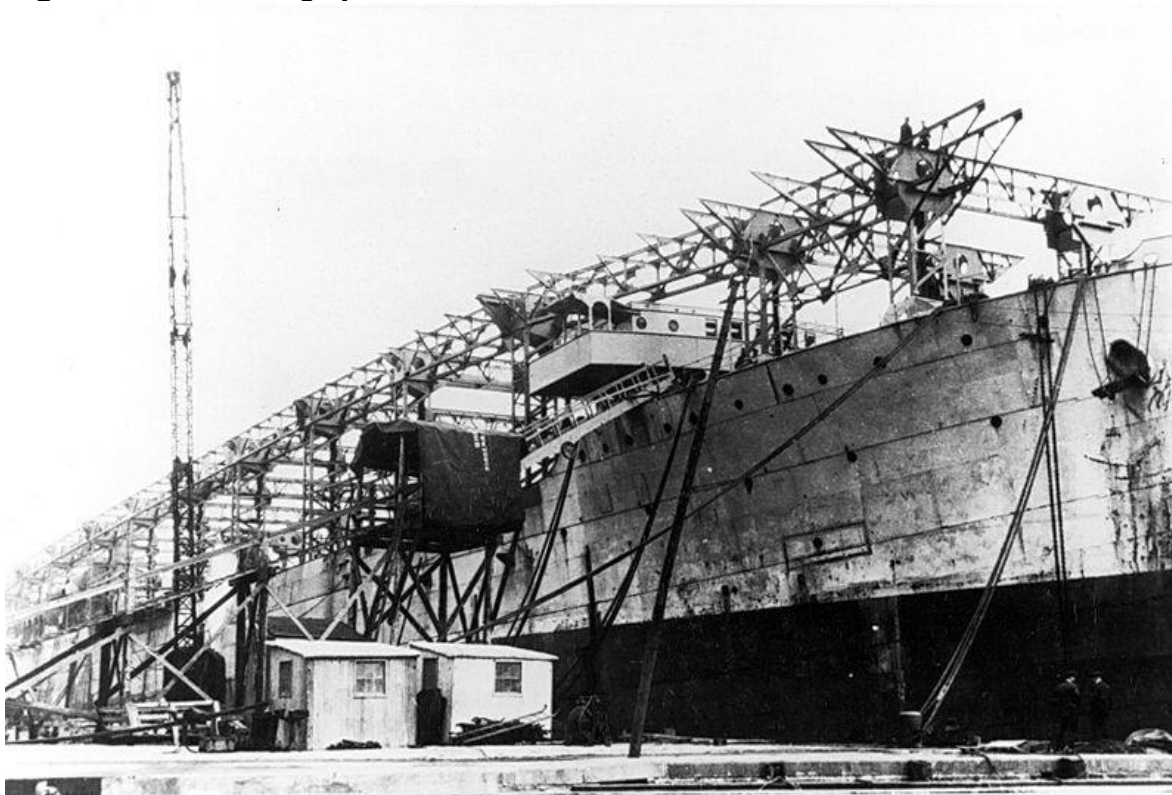


Figura 3 - Vista aérea do USS "Langley"

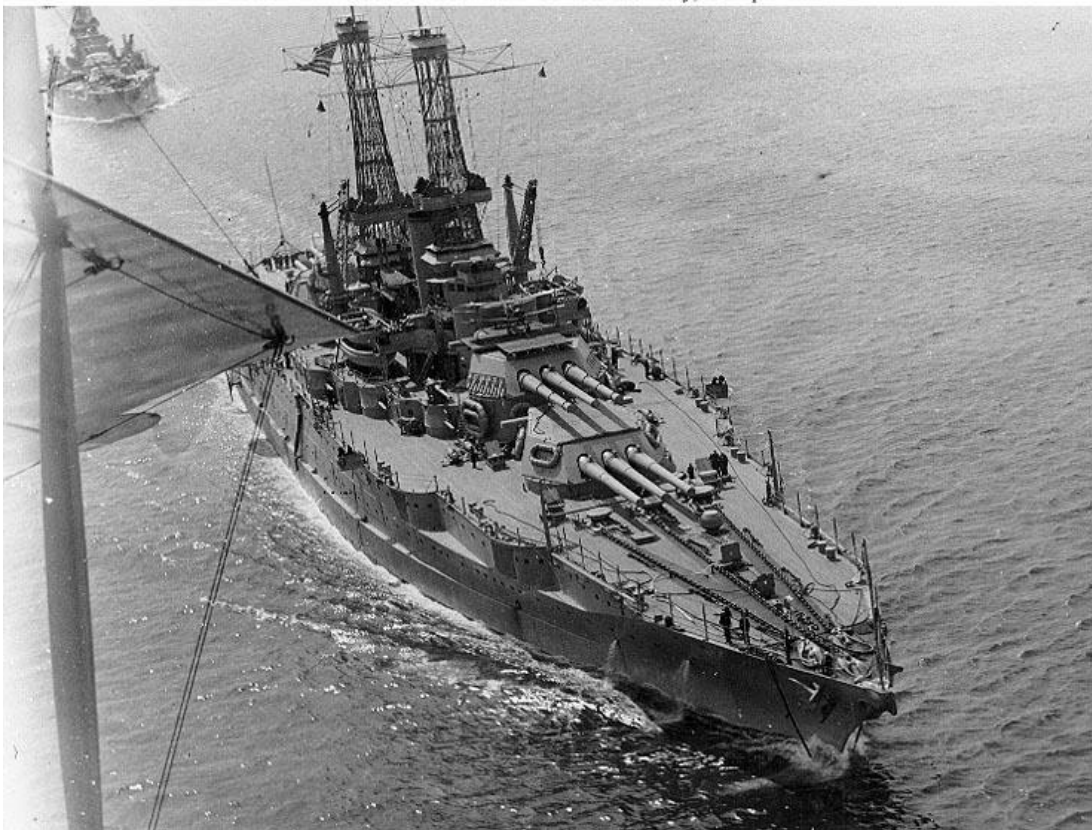


Fonte: <https://catalog.archives.gov/id/520639>

O período entre guerras foi extremamente proveitoso para a história e evolução da propulsão elétrica em navios americanos, já que mais de 50 navios foram construídos com este tipo de propulsão. Pode-se verificar que, a partir de então, foi aperfeiçoada a inovação e, notavelmente, a potência demonstrou-se um fator importante. Em 1915, o navio USS "New México" também recebeu a instalação de propulsão elétrica com 30 MW de potência.

Figura 4 - USS "New México"

Photo # NH 59949 USS New Mexico underway, 13 April 1919



Fonte: www.ibiblio.org

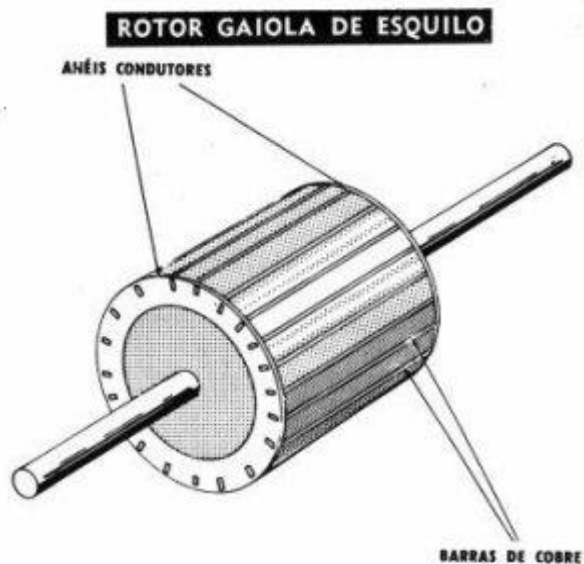
A instalação propulsora consistia em dois turbo-geradores de 11,5 MW alimentando quatro motores elétricos de indução diretamente conectados a quatro eixos. Tal arranjo possuía um peso total de aproximadamente 500 t.

Este navio possui uma característica especial, que o levou a apresentar uma das grandes inovações à época. USS "New México" possuía a instalação de motores do tipo Gaiola de Esquilo, que possuem a capacidade de fornecer um torque quase que constante para a faixa de velocidade do rotor, por isso não precisam de resistências no circuito. Tal motor era também capaz de desenvolver um torque dezessete vezes superior ao disponível em motores com rotor bobinado da época.

Os motores de indução também eram dotados de chaves comutadoras de pólos, permitindo que eles operassem com 24 ou 36 pólos, proporcionando uma razão de redução de 12:1 e 18:1, respectivamente. Este dispositivo proporcionava um controle grosseiro da velocidade do navio, sendo o ajuste fino obtido através da variação da rotação das turbinas. (LEAL FERREIRA,

2004, p.3).

Figura 5 - Rotor "Gaiola de Esquilo".



Fonte: <http://www.reocities.com>

Além do USS "New México", podemos citar o segundo e o terceiro navios-aeródromo da Marinha Americana como grandes marcos na adoção da propulsão elétrica, USS "Lexington" e USS "Saratoga", com potência instalada de 135 MW.

Figura 6 - USS "Lexington".



Fonte: <http://navy.memorieshop.com>

Figura 7 - USS "Saratoga"



Fonte: <http://www.maritimequest.com>

Alterando o foco da América para Europa, e de navios de guerra para navios mercantes, pode-se deparar com o transatlântico "Normandie" que teve seu projeto lançado em 1932 na França e é apontado como o melhor exemplo de utilização de propulsão elétrica em detrimento das tradicionais engrenagens redutoras. O transatlântico com seu sistema de propulsão consistindo de quatro turbo geradores com total de 119,3 MW instalados apresentou diversas vantagens, dentre elas, alta razão de redução obtida, eliminação de turbinas reversoras, redução do número necessário de turbinas com conseqüente redução no consumo de combustível e uma maior confiabilidade do sistema.

Figura 8 - SS "Normandie"



Fonte: <http://www.marinersmuseum.org>

O uso da propulsão elétrica no navio foi motivado basicamente por dois fatores cruciais. O primeiro era o fato de os franceses não serem exímios fabricantes de componentes de aço, o que implica dificuldade de confeccionar as engrenagens. Segundo e primordial, os franceses eram experientes em lidar com sistemas elétricos.

O "Normandie" era dotado de quatro motores síncronos, do tipo gaiola de esquilo, acionados por quatro turbo-geradores arranjados de maneira a formarem duas unidades separadas de dois turbo-geradores cada. A velocidade do navio era controlada pela mudança da velocidade de rotação dos turbo geradores, de modo semelhante ao sistema do USS "New México". (MEIRELLES, 2004, p.3).

Em meio a Segunda Guerra Mundial foram construídos um número superior a 160 navios de escolta detentores de propulsão elétrica para a Marinha Americana, sendo que neles eram utilizados turbo ou diesel geradores na faixa de 4,5 a 9,0 MW. Foram também equipados com propulsão elétrica cerca de 500 navios de pequeno porte, sendo estes em corrente contínua e com potência instalada na faixa de 225 MW a 15MW.

Nesta época, a propulsão elétrica foi bastante difundida, pois existia a falta de capacitação técnica para a produção em larga escala de engrenagens e isso era crucial para a escolha do sistema de propulsão no período bélico.

Na década de 1940 houve uma reviravolta, com o desenvolvimento na tecnologia dos sistemas de engrenagens de dupla redução, preços competitivos foram apresentados como vantagens a instalação das engrenagens. Soma-se a isso as desvantagens apresentadas da propulsão elétrica como seu peso e volume superiores, eficiência energética inferior. E assim o crescente uso da propulsão elétrica foi freado, dando lugar a convencional propulsão mecânica.

A mudança da preferência do tipo de propulsão a ser empregada em larga escala também foi influenciada pelas melhorias tecnológicas obtidas no setor de metalurgia e na manufatura de engrenagens redutoras com peso e volume menores e melhores resultados no desempenho acústico dos equipamentos. (ALVES, 2007, p.8).

O cenário durou até começo do século XXI, durante as décadas de 1980 a 1990, dois fatos se consolidavam, a capacidade de transmissão mecânica atingia seu limite tecnológico e de viabilidade econômica e os avanços na área de eletrônica de potência seguiam firmes e tornavam a transmissão elétrica mais eficiente e compacta. Desse modo, a propulsão elétrica voltou a desempenhar o papel de protagonista, agora em navios de diversas classes, como quebra-gelos, navios tanque e mais.

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

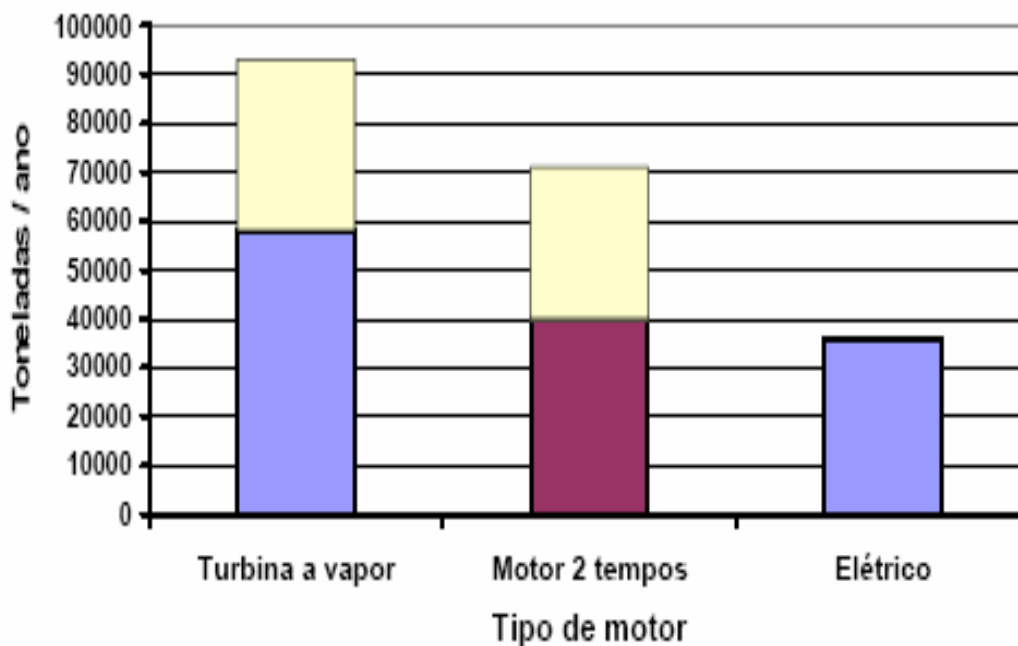
3 PRINCIPAIS VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

Uma característica que levou a atual tendência de adoção da propulsão elétrica é o reconhecimento do quão importante é projetar visando o custo de vida útil, em detrimento de minimizar custos de obtenção iniciais às custas de altas despesas de manutenção e modernização ao longo da vida do meio. Segue abaixo algumas das principais vantagens e desvantagens da propulsão elétrica.

3.1 Redução do consumo de combustível

No motor elétrico, o motor principal pode operar em uma faixa ótima independente da velocidade requerida no hélice por não haver ligação mecânica entre os dois, enquanto em navios com propulsão mecânica tradicional, a velocidade do motor é que define a rotação do hélice; conseqüentemente, dependendo do perfil de operação do navio, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, associado às altas velocidades. Por operar desta maneira, o consumo do motor elétrico fica em torno de 17% menor do que o consumo de um motor Diesel.

Figura 9 – Consumo de Combustível
Consumo de combustível



Fonte: Google imagens

3.2 Redução da tripulação

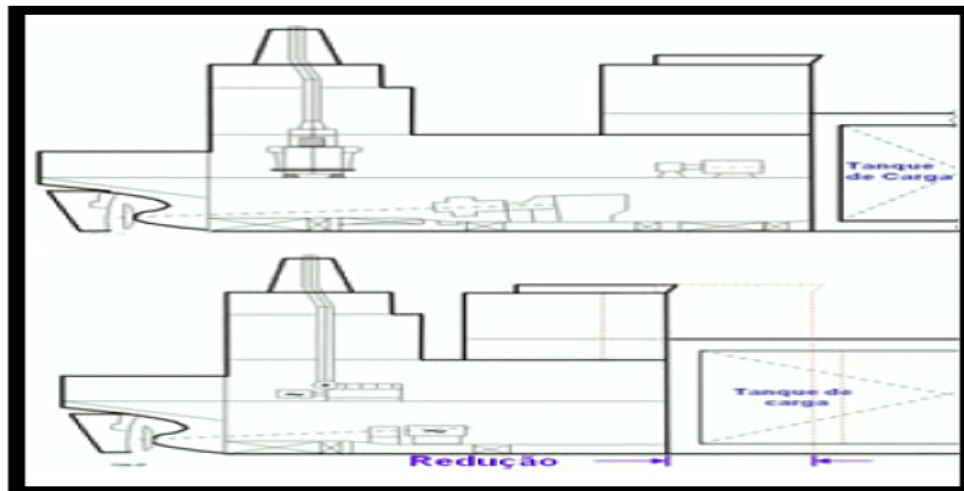
A tendência para os futuros navios elétricos é de uma ampla difusão de sistemas auxiliares e acessórios alimentados por eletricidade, em substituição aos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Sistemas elétricos são mais fáceis de controlar à distância e possuem maior compatibilidade com controles eletrônicos, o que possibilita o incremento de automação com consequente redução de tripulação, proporcionando adicional benefício através da redução de custo operacional para o armador considerando os custos durante a vida útil do motor, ou seja, sem considerar os custos de aquisição de sistemas automatizados e nem os custos com a manutenção de tais sistemas que demandam mão de obra mais especializada e constante atualização.

3.3 Flexibilidade do Projeto

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e, portanto, não precisam ser instalados uns próximos aos outros, o que permite uma maior flexibilização na instalação dos equipamentos de forma a obter arranjos que possibilitem o aumento na capacidade de carga do navio.

No navio com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pelo navio será gerada pelos motores principais, torna-se desnecessário, assim, 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. Esta diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço. Na figura abaixo fica evidente o aumento do tanque de carga, o que acarreta em maior lucro para o armador durante toda a vida útil do navio.

Figura 10 – Distribuição dos equipamentos na Praça de Máquinas



Fonte: Google imagens

3.4 Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio

A modularidade e a flexibilidade proporcionam um sistema de geração de energia e de propulsão redundantes, distribuídos e reconfiguráveis, conseqüentemente os danos em

um compartimento de máquinas, sejam provocados por incêndio, alagamento ou simplesmente mau funcionamento, podem facilmente ser detectados e “by-passados”, mantendo-se o funcionamento do sistema inalterado. Tal facilidade torna possível o redirecionamento da energia de bordo em caso de falhas simultâneas.

3.5 Redução dos Custos de Manutenção

Uma vez que com a adoção da Propulsão Elétrica não são necessários motores auxiliares, esta redução na quantidade de equipamentos instalados resulta numa diminuição dos custos de manutenção. Associado a este fato, sabe-se que os equipamentos elétricos apresentam custos e períodos menores de manutenção e devido à elevada automação dos sistemas elétricos, as manutenções preditiva e preventiva são ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção. Além disso a adoção de sistemas elétricos comuns em diversas embarcações reduz os custos de manutenção à medida que viabiliza o uso de ferramentas de sistemas comuns, bem como de sistemas e componentes. Com sistemas comuns os custos de manutenção, logística e riscos de projetos são consideravelmente reduzidos.

3.6 Redução da Emissão de Poluentes

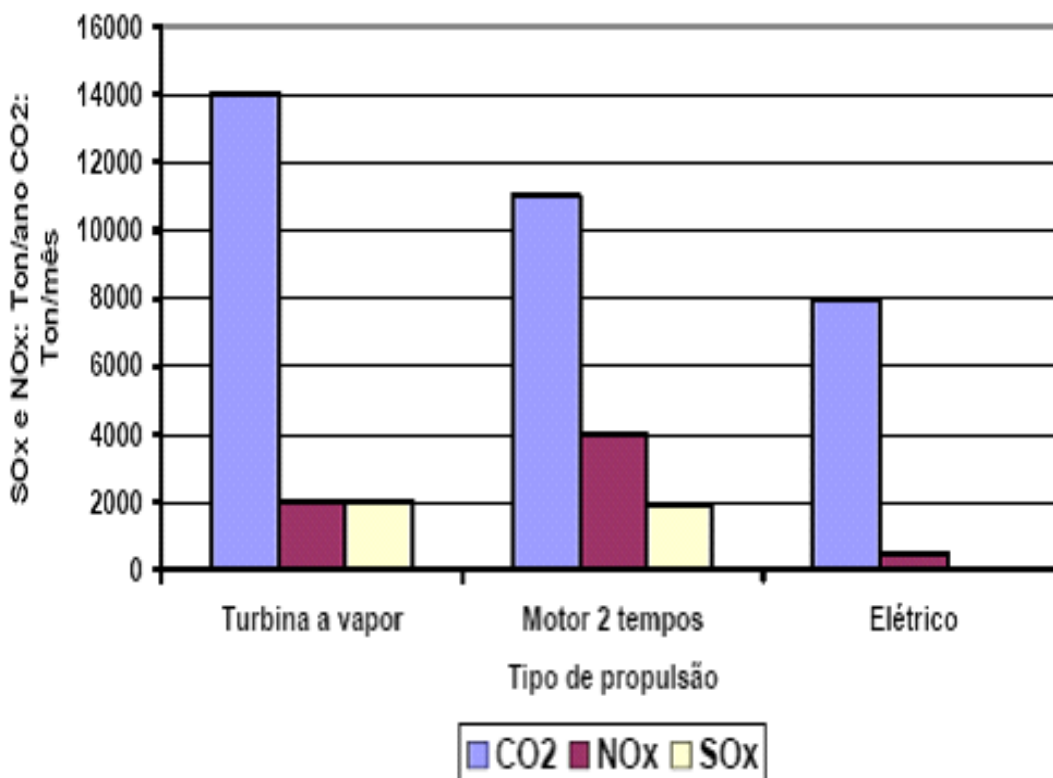
Todos os tipos de poluentes emitidos (gasosos, líquidos ou sólidos) estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações (ex: MARPOL) estão sendo desenvolvidas com requisitos mais rigorosos. Com o aumento da pressão internacional pela diminuição do uso de combustíveis fósseis, torna-se cada vez mais importante a adoção de sistemas de propulsão mais econômicos, tendo em vista que as emissões de gases poluentes oriundos da queima de óleo diesel e gasolina são os maiores responsáveis pelo efeito estufa. Neste contexto, a propulsão elétrica está sendo fortemente indicada, principalmente para navios que operam em países que assinaram o Protocolo de Kyoto. Levando-se em conta tais aspectos, a propulsão elétrica apresenta algumas vantagens em relação à propulsão mecânica, tais 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.

A figura apresenta claramente que a Propulsão Elétrica gera menos gases poluentes que os sistemas que utilizam propulsão mecânica, pois o motor elétrico opera constantemente no ponto ótimo de projeto, o que proporciona uma redução no consumo de combustível e conseqüentemente uma menor liberação de gases poluentes (ex: CO₂ - Dióxido Carbônico, NO_x – Óxido de Nitrogênio e SO_x – Óxido de Enxofre) durante as operações. É interessante destacar que o modelo utilizado na pesquisa considerou também a geração de gases durante a operação portuária e tempos com o navio parado durante as viagens.

Figura 11 – Emissão de Poluentes



Fonte: Google Imagens

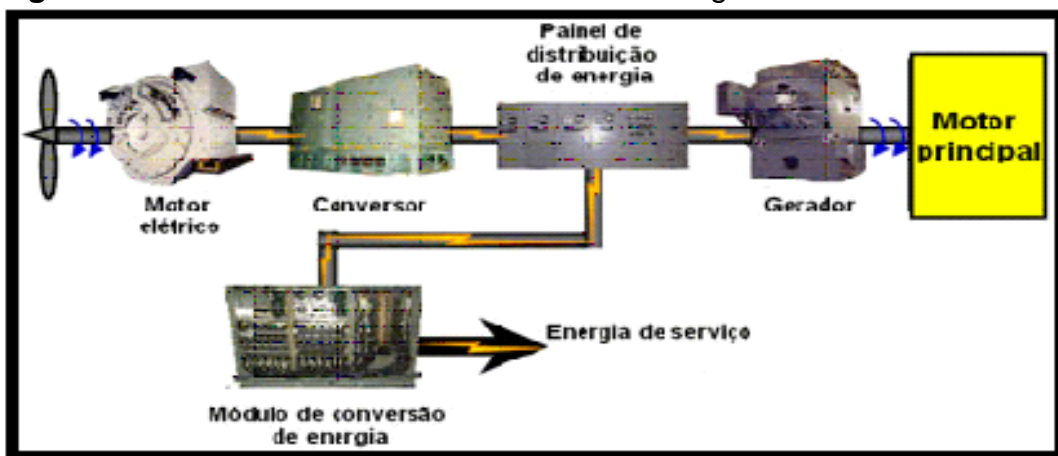
4 COMPARAÇÃO ENTRE PROPULSORES ELÉTRICOS E MECÂNICOS

Propulsão Elétrica pode ser definida como um sistema constituído por um gerador elétrico, acionado por um dispositivo de acionamento principal, que fornece energia para um motor elétrico que por sua vez aciona o hélice do navio. Tem como principal característica o controle da velocidade do navio pelo ajuste da rotação do motor elétrico.

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

Desta forma, o conceito de propulsão elétrica apresenta como vantagem a 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 12 – Sistema de Acionamento Elétrico Integrado



Fonte: Google Imagens

Nos navios dotados de Propulsão Mecânica tradicional, a rotação do motor diesel define a rotação do hélice, portanto, o motor em algumas condições de operação não opera na faixa do rendimento ótimo, o que acarreta desperdício de combustível. No

sistema de propulsão mecânico convencional o dispositivo de acionamento principal a ser empregado, que pode ser uma turbina a vapor, um motor diesel, ou uma turbina a gás, é acoplado diretamente ao eixo propulsor do navio através da engrenagem redutora.

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

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

5 MOTOR DE INDUÇÃO

5.1 Introdução

O motor de indução ou assíncrono é o tipo de motor elétrico mais utilizado a bordo, sua principal vantagem é o fato de sua construção ser bastante simples e robusta, fazendo com que o custo de fabricação seja mais reduzido quando comparado a outros tipos de motores elétricos. A sua manutenção também é mais simples o que faz com que sua vantagem econômica seja tanto na hora da aquisição quanto ao se considerar toda sua vida útil e podem ser utilizados para uma vasta gama de aplicações, com motores que vão desde alguns poucos watts até motores de grande porte que fornecem MW de potência.

Apesar das vantagens listadas, os motores de indução eram pouco utilizados até alguns anos atrás, pois quando a aplicação envolvia velocidade variável e controlada era necessário um equipamento adicional ou a perda de potência era muito grande. Apesar das muitas tentativas de evolução nas tecnologias que envolvem esse tipo de motor a fim de aumentar sua eficiência, as soluções encontradas envolviam modelagens matemáticas muito complexas que envolviam grande esforço computacional e muitas vezes os conversores de potência tinham desempenho insatisfatório. Somente com o avanço da tecnologia na área de semicondutores de potência foi possível alcançar avanços satisfatórios utilizando conversores estáticos de potência associados a microprocessadores de alto desempenho que tornaram os motores de indução competitivos com as tecnologias concorrentes.

O avanço da tecnologia também contribuiu para o aprimoramento das técnicas de modelagem, pois com os novos processadores e programas, existentes no mercado, é possível realizar estudos e simulações de forma bem precisa e rápida. E com estas novas técnicas de modelagem e acionamento, o desempenho do servossistema CA com motores de indução igualou-se ao do servossistema CC. Uma vez que o custo dos motores de indução é bem inferior, os servossistemas CA, se tornaram também muito mais interessantes, e existem dois tipos de motores de CA: o motor de indução gaiola de esquilo e o motor de indução de rotor bobinado. Por serem motores de um porte

grande demais para serem utilizados em navios, os motores do tipo rotor bobinado não são utilizados em navios mercantes.

5.2 Princípio de Funcionamento

O enrolamento de um motor de indução ao qual a energia elétrica é conectada é distribuído ao redor do estator e produz no entreferro um campo magnético girante que roda em sincronismo com a frequência da rede elétrica (excitação $f =$ frequência de excitação). O fluxo magnético “corta” os condutores dos enrolamentos do rotor gaiola de esquiço conforme o campo magnético gira, gerando uma tensão elétrica nos mesmos e conseqüentemente uma corrente nestes enrolamentos, a qual por sua vez produz um fluxo magnético que se opõe ao criado no estator. As correntes, portanto, que circulam no enrolamento da gaiola por indução criam uma distribuição de força magneto-motriz a qual interage com a distribuição de campo para produzir um torque líquido unidirecional. Esta inter-relação entre os fluxos do rotor e do estator produz este torque e faz com que o rotor siga o movimento do fluxo magnético do estator.

A frequência da corrente induzida no condutor do rotor é ditada pela velocidade do rotor na qual está colocada; contudo, a relação entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente de armadura é tal que dá uma distribuição Ampère-condutor resultante estacionária em relação à distribuição do campo produzida pela armadura. Como resultado, o motor de indução com excitação única é capaz de produzir torque a qualquer velocidade abaixo ou acima da velocidade síncrona, e por esta razão é classificado como uma máquina assíncrona.

A característica principal de dispositivos eletromecânicos de conversão de energia com excitação única consiste em que a velocidade do rotor não pode ser nunca igual à velocidade síncrona, visto que a corrente do enrolamento do rotor é produzida por indução, e, portanto, deve sempre existir uma diferença de velocidade entre o campo do estator e o enrolamento do rotor. Essa diferença de velocidade, ou escorregamento, é uma variável muito importante para o motor de indução.

Se o motor girar a uma velocidade que não a velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor vai cortar as linhas de força magnética do campo

girante e, conforme as Leis do Eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o torque necessário para acioná-la. Para obter um maior torque, proporcionalmente terá que ser maior a diferença de velocidades entre o rotor e o campo girante do estator para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Logo, à medida que a carga aumenta, a rotação do motor diminui. Quando a carga for nula (motor a vazio) o rotor irá girar praticamente na rotação síncrona. A vazio o escorregamento é muito menor, portanto, como no rotor, sua reatância e sua f.e.m. induzida são todas muito pequenas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, apenas o suficiente para produzir o torque necessário a vazio. O fator de potência é muito baixo e em atraso, pois a corrente a circular pelo motor é utilizada somente para a sua magnetização.

A velocidade decresce um pouco quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor. A pequena diminuição na velocidade causa um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na sua reatância e na sua força eletromotriz induzida. O aumento da corrente induzida no rotor causa um aumento da corrente primária do estator (componente esta que produz potência). Uma corrente maior será produzida no estator, com um melhor fator de potência, tendendo a produzir mais potência mecânica e solicitar mais potência da linha. À plena carga, o motor de indução irá girar a um escorregamento que promove o equilíbrio entre o torque desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

Se a velocidade do rotor for idêntica à velocidade síncrona, tem-se $s=0$, e se o rotor for estacionário, resulta que $s=1$. Para os motores de indução convencionais, os valores de escorregamento variam entre zero e um. Como a frequência das correntes no rotor está diretamente relacionada à velocidade relativa do campo do estator ao enrolamento do rotor, podemos escrever:

5.3 O Circuito Equivalente

A operação de um motor de indução trifásico é baseada na indução de tensões e correntes no circuito do rotor através de uma alimentação no circuito do estator, ou seja, através de uma ação semelhante ao transformador. Portanto, o circuito equivalente de

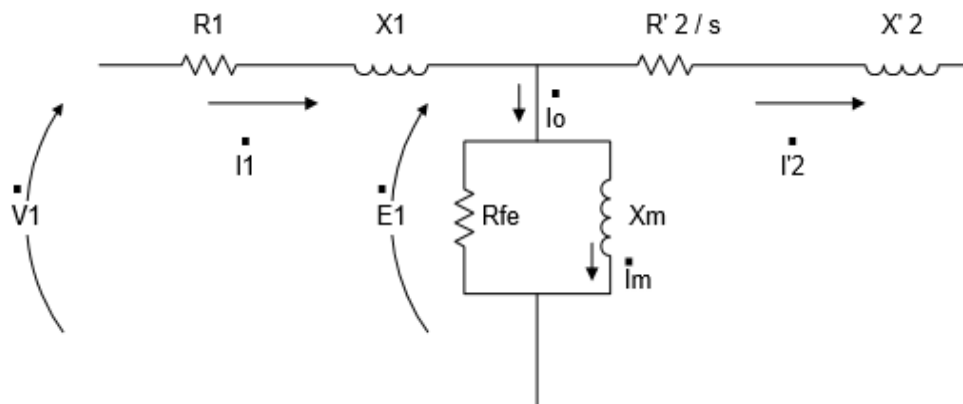
um motor de indução trifásico será muito parecido com o circuito equivalente monofásico de um transformador. A diferença fundamental entre o circuito equivalente monofásico de um transformador e do motor em questão, diz respeito a representação do circuito do rotor devido à variação da frequência do rotor em função da velocidade de rotação do motor.

5.4 O Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico

Em regime estacionário o motor de indução é apenas um transformador curto circuitado com enlace de fluxo relativamente pobre entre o enrolamento do estator e as barras do rotor devido ao entreferro. Neste caso, há potência elétrica transferida entre rotor e estator, a qual é dissipada pelas perdas nas barras do rotor e no ferro. Porém, o campo magnético girante no entreferro, resultante da interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor produz conjugado e, se este for o bastante para mover a carga no eixo, resulta em rotação. Sob esta circunstância, a potência elétrica transferida pelo estator que atravessa o entreferro é dissipada em perda joule do rotor e na potência de saída mecânica.

Estes vários fenômenos e interações podem ser identificados, representados e quantificados pelo simples circuito equivalente monofásico de 6 (seis) elementos, conforme indicado na figura a seguir:

Figura 13 - circuito equivalente monofásico de 6 (seis) elementos



Fonte: Google imagens

R_1 = Resistência do enrolamento do estator por fase;
 X_1 = Reatância de dispersão do enrolamento do estator por fase;
 R_{fe} = Resistência correspondente às perdas do núcleo magnético por fase;
 X_m = Reatância de magnetização por fase;
 R'_2 = Resistência do enrolamento do rotor refletida ao estator por fase;
 X'_2 = Reatância de dispersão do enrolamento do rotor refletida ao estator por fase;
 I_1 = Corrente de fase do estator;
 I_2 = Corrente de fase do rotor refletida ao estator;
 I_m = Corrente de magnetização por fase;
 E_1 = Força eletromotriz induzida refletida ao estator; e
 V_1 = Tensão monofásica aplicada ao enrolamento do estator

5.5 Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor de Indução

Os parâmetros descritos nesta seção representam os fenômenos físicos mencionados na seção anterior.

5.5.1 Resistência do Enrolamento do Estator por fase (R_1)

Esta componente é denominada de resistência do enrolamento do estator por fase e representa as perdas joule (I^2R) do enrolamento do estator.

5.5.2 Resistência do enrolamento do Rotor Refletida ao Estator por fase (R'_2)

Esta componente denominada resistência do rotor refletida ao estator por fase representa a parcela das perdas joules (I^2R) das barras curto-circuitadas do rotor.

5.5.3 Reatância de Dispersão do enrolamento do Estator por fase (X_1)

A componente denominada reatância de dispersão do estator por fase representa a parcela referente aos fluxos que enlaçam totalmente ou parcialmente os enrolamentos do estator, entretanto, não contribuem para o fluxo útil do motor, ou seja, fluxo mútuo entre estator e rotor.

5.5.4 Reatância de Dispersão do enrolamento do Rotor refletida ao Estator por fase ($X'2$)

A reatância de dispersão do rotor por fase representa a parcela referente aos fluxos que enlaçam totalmente ou parcialmente as barras do rotor, entretanto, da mesma maneira no caso do estator, não contribuem para o fluxo útil (concatenado) do motor. Esta parcela de dispersão pode ser decomposta pelos mesmos tipos observados na reatância de dispersão do estator, com a ressalva de que são fluxos dispersos no rotor.

5.5.5 Reatância de Magnetização por fase (X_m)

A reatância de magnetização por fase representa a parcela do fluxo mútuo entre o estator e o rotor, que provoca a indução de tensão nas barras do rotor.

5.5.6 Resistência correspondente às perdas do núcleo magnético por fase (R_{fe})

Este parâmetro representa as perdas magnéticas no núcleo por fase do motor devido às correntes parasitas e ao fenômeno de histerese, que são, respectivamente, perdas por correntes induzidas nas chapas do motor e perdas devido às características não lineares do ferro.

6 A PROPULSÃO ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA

6.1 Introdução

O avanço no estado da arte da eletrônica de potência é um fator importante para o desenvolvimento recente da propulsão elétrica. Os dispositivos da eletrônica de potência são semicondutores e podem permitir ou não a passagem de corrente elétrica, entretanto não são capazes de chavear altas correntes a altas potências, de maneira que controle, distribua e processe a potência elétrica. Comparando-se às chaves eletromecânicas, eles são menores, mais rápidos e mais precisos, além de serem mais fáceis de controlar, mais baratos e mais eficientes.

Foram desenvolvidos muitos conceitos de propulsão elétrica em corrente alternada para utilizar-se a bordo e os mais comumente utilizados são em navios mercantes, quebra-gelos e “ferries”.

6.2 O Inversor Fonte de Corrente (CSI)

Os estágios de retificação e inversão são separados por um elo contendo um indutor de alto valor que deve manter a corrente constante no link e para simular uma fonte CC. O elo em corrente contínua separa as frequências entre o lado da fonte e o lado do motor, permitindo que a velocidade do motor não se limite ao valor da frequência da fonte de alimentação, o que possibilita que o motor trabalhe com frequências maiores do que as fornecidas pela fonte.

Este tipo de conversor é amplamente utilizado indústria de navios de passageiros (transatlânticos), em faixas de potência de 1 MW até 100 MW. Seu princípio de funcionamento já é bastante difundido, sendo assim, uma tecnologia extremamente confiável e com consolidado domínio de mercado. Uma das utilizações da tecnologia do Inversor Fonte de Corrente para a propulsão elétrica é encontrada no Navio Transatlântico “Queen Elizabeth II”, que possui duas unidades conversoras com 11,5 MW cada. A tensão de alimentação dos conversores é de 10 kV, e cada tiristor opera com 3.600V e 1.278A.

Figura 14 - Navio Queen Elizabeth II



Fonte: <http://www.maritimequest.com>

O Inversor de Fonte de Corrente possui as seguintes vantagens:

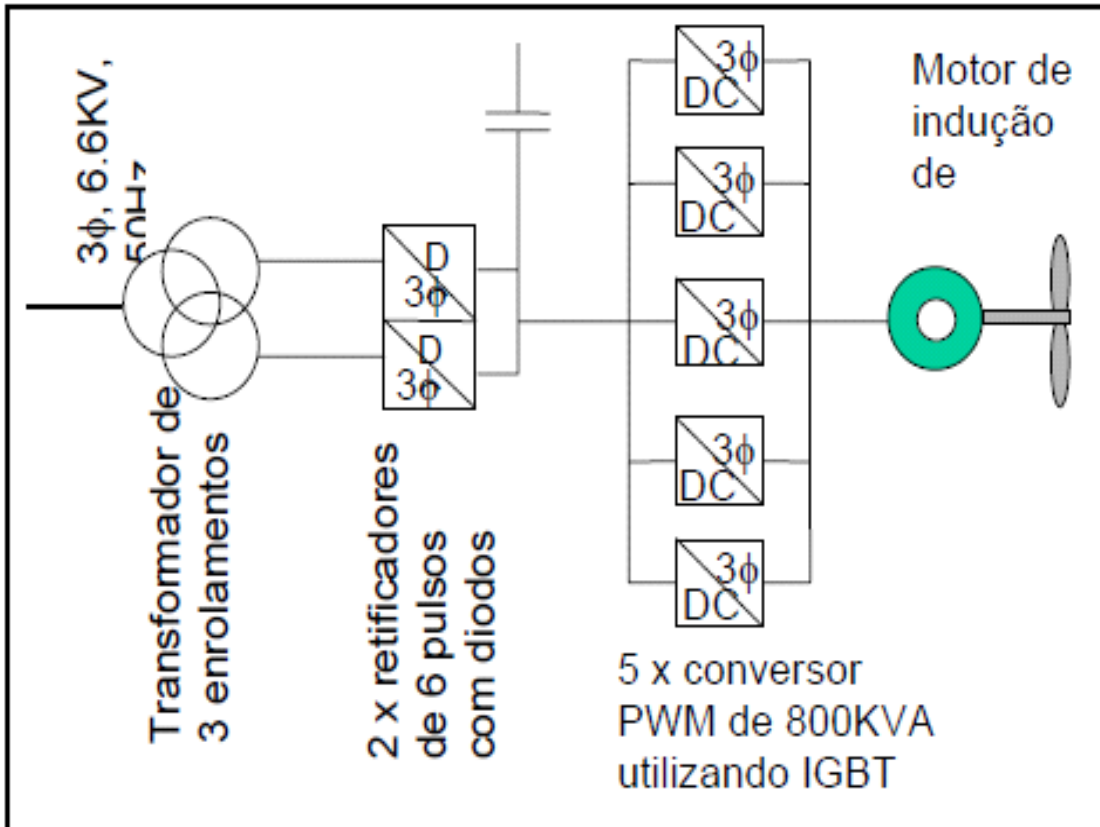
- A frequência de saída do conversor pode ultrapassar o valor da frequência da fonte de alimentação;
- Por utilizar tiristores como dispositivo de chaveamento, possui circuitos de controle mais simples, pois operam com o princípio da comutação natural;
- O controle dos tiristores tem a característica de adaptar-se rapidamente às variações nas demandas de potência do sistema de propulsão do navio;
- Os altos níveis de potência e tensão podem ser alcançados através do uso dos tiristores em série ou pela conexão em série de diversos conversores;
- Os elevados valores de tensão e os pequenos valores de corrente de operação permitem a diminuição das perdas de potência no conversor, nos transformadores e nos cabos;
- A tolerância a faltas é mais uma característica deste conversor, o que lhe garante alta confiabilidade. Quando o tiristor falha, torna-se um curto circuito para o dispositivo. Esta característica possibilita que os tiristores defeituosos possam ser isolados, para conserto, e o conversor permanece trabalhando normalmente; e
- O uso deste tipo de conversor permite uma operação do sistema propulsor mais

silenciosa, ideal para utilização em navios de passageiros.

6.3 Modulação por Largura de pulso

O sistema PWM caracteriza-se por um link de corrente contínua que é alimentado pelo sistema de corrente alternada através de um retificador usando diodos. Um banco de capacitores é utilizado para aliviar a tensão do link de corrente contínua e para diminuir o efeito de distorção harmônica causado pelo inversor. O nível de harmônicos gerados por este sistema é menor que o gerado pelo cicloconversor e é proporcional à velocidade do motor elétrico. Tais harmônicos ainda podem ser reduzidos com o emprego de transformadores com três enrolamentos que alimentam um conversor em uma configuração de 12 ou 24 pulsos. A tensão AC fornecida ao motor é gerada pelo inversor por meio da seleção de fatias da tensão DC de modo a construir uma tensão AC. Como aplicação desta tecnologia podemos citar os “ferries” “Schleswig Holstein” e “Deutschland” que entraram em operação em 1997. O sistema instalado a bordo destes “ferries” consiste de quatro propulsores azimutais acionados por motores de indução de 3,1 MW controlados por um conversor PWM. O transformador de três enrolamentos alimenta os dois retificadores de seis pulsos, fornecendo tensão DC para o inversor PWM, consistindo de cinco conversores que alimentam os motores de indução.

Figura 15 – O Sistema PWM



Fonte: Google imagens

Nestes navios o controle em um único quadrante é requerido, porém, o controle total nos quatro quadrantes pode ser obtido substituindo-se os diodos do retificador por IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors).

6.4 Cicloconversor

O sistema cicloconversor é usualmente utilizado quando existe o requisito de uma boa resposta dinâmica a velocidades baixas, sendo, assim, adequados para utilização em quebragelos e “ferries”. Sem um link de corrente contínua, o cicloconversor é um conversor direto. A tensão AC fornecida ao motor elétrico é constituída por meio da seleção de segmentos das fases da tensão fornecida ao conversor realizada a partir do controle de uma ponte de tiristores antiparalela.

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 vantajosas desta configuração conversora 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.(ALVES, 2007, p.38).

O cicloconversor pode ter uma configuração de 6 pulsos ou 12 pulsos para redução de harmônicos. A tensão do motor é controlável até o limite de um terço da frequência de alimentação do conversor, fazendo com que o cicloconversor seja mais apropriado para baixas velocidades (0 a ± 300 rpm) sem o uso de engrenagens redutoras.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como pode ser observado até aqui, a propulsão elétrica foi associada, sobretudo a altas potências e sua utilização era atribuída a navios de grande porte, isso se considerarmos o peso e volume dos motores elétricos.

Os anos 1960 foram essenciais, quando se fala em investimentos em tecnologias que visassem melhorar o desempenho e a densidade de potência de máquinas elétricas com enfoque na propulsão de navios, ou seja, queria-se criar condições para implantar propulsão elétrica em navios de pequeno porte.

Motores de menores dimensões permitiriam uma redução no ângulo de inclinação dos eixos e um posicionamento mais a ré em cascos com restrição de espaço, com conseqüente redução do tamanho das linhas de eixo. A disponibilidade de motores elétricos de propulsão com pequeno diâmetro e elevado torque poderia tornar viável a utilização de “pods” de propulsão em substituição ao arranjo convencional de linhas de eixo para navios de pequeno porte, tais como navios de guerra. (MEIRELLES, 2004, p.7).

Os “pods” são largamente adotados em navios de passageiros, pois oferecem uma maior eficiência da propulsão e liberam espaços internos do casco, já que o motor de propulsão elétrica fica situado fora do casco, instalando em estruturas estanques suspensas. O equipamento pode virar 360° e facilitar a manobrabilidade no navio.

Figura 16 - "Pods" em navio de passageiros



Fonte: www.ibiblio.org

Os Pods já são utilizados em navios de passageiros, entretanto a adequação do sistema em navios de guerra, incluindo suas características de vibração e assinatura acústica, estão atualmente em investigação.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com foi visto anteriormente neste trabalho, as apostas na propulsão elétrica se mostraram de grande sucesso devido ao seu histórico nos últimos 100 anos. É certo que a propulsão elétrica já se apresenta como padrão aos navios comerciais de cruzeiro e nas marinhas de guerra do Reino Unido e dos Estados Unidos, tudo isso porque este tipo de propulsão se apresentou extremamente benéfico.

A propulsão elétrica ainda possui um potencial para evoluir, conquistar mais mercados e dominar a indústria marítima em definitivo, deixando para trás as engrenagens redutoras e permitindo grande flexibilização na disposição de equipamentos a bordo, permitindo que o motor opere constantemente na faixa de ótimo desempenho e reduzindo o consumo de combustível, bem como a emissão de gases poluentes e diminuindo custos para com manutenção.

Ainda existirão outros muitos capítulos sobre este tipo de propulsão, que foi vista com grande potencial e não ficou apenas no plano das ideias. Colocada em prática, foi extremamente útil e ainda alcançará novos patamares em um futuro próximo.

REFERÊNCIAS

Catalog archives, USS Langley sendo convertido. Disponível em: <<https://catalog.archives.gov>>. Acesso em 23 de abril de 2017.

Catalog archives, Vista aérea do USS Langley. Disponível em: <<http://www.marinersmuseum.org>>. Acesso em 23 de abril de 2017.

FREIRE, P., R., M., FERREIRA, C., L., 2004, “Propulsão Elétrica – Histórico e Perspectivas Futuras”, 20º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2004, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA

Google imagens, Consumo de Combustível. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> >. Acesso em 11 de julho de 2017.

Google imagens, Distribuição dos equipamentos na praça de máquinas. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> >. Acesso em 11 de julho de 2017.

Google imagens, Emissão de gases poluentes. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> >. Acesso em 12 de julho de 2017.

Google imagens, Sistema de acionamento elétrico integrado. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> >. Acesso em 21 de julho de 2017.

Google imagens, Circuito equivalente monofásico. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> >. Acesso em 21 de julho de 2017.

Google imagens, Sistema PWM. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi> br>. Acesso em 3 de agosto de 2017.

Ibiblio, USS Júpiter. Disponível em: <www.ibiblio.org>. Acesso em 20 de abril de 2017.

Ibiblio, USS New México. Disponível em: <www.ibiblio.org>. Acesso em 20 de abril de 2017.

Ibiblio, “Pods” em Navio de passageiros. Disponível em: <www.ibiblio.org>. Acesso em 3 de agosto de 2017.

Maritime quest, USS Saratoga. Disponível em: <<http://www.maritimequest.com>>. Acesso em 24 de abril de 2017.

Maritime quest, Navio Queen Elizabeth II. Disponível em: <<http://www.maritimequest.com>>. Acesso em 27 de julho de 2017.

Marine museum, SS Normandie. Disponível em: <<http://www.marinersmuseum.org>>. Acesso em 4 de julho de 2017.

Navy memories, USS Lexington. Disponível em: <<http://navy.memorieshop.com>>. Acesso em 24 de abril de 2017.

PEREIRA, N., N., BRINATI, H., L., 2006, “Estudo do Impacto da Propulsão Diesel-Elétrica Na Emissão de Gases Poluentes”, 22º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2006, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.

PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS. Renata Nunes Alves 2007

Reocities, Rotor Gaiola de Esquilo. Disponível em: <<http://www.reocities.com>>. Acesso em 4 de julho de 2017.

Navy memories, USS Lexington. Disponível em: <<http://navy.memorieshop.com>>.

Acesso em 24 de abril de 2017.