MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

MATHEUS RODRIGUES MEIRELLES

Sistemas Híbridos e a Geração de Energia Elétrica a bordo de navios

RIO DE JANEIRO

2013

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....3

1. OS SISTEMAS HÍBRIDOS

Sistemas Híbridos 4

Fluxo de potência 6

Como funciona 7

Fases de operação.....7

Problemas ambientais.....9

Utilização de materiais raros.....10

2. OS SISTEMAS HÍBRIDOS EM NAVIOS

Histórico 11

Composição do sistema.....12

Distribuiçao de energia 14

ECMS.....14

Propulsores elétricos.....15

Azipods™.....16

Siemens Schottel™ 18

Voith Schneider™.....19

Sistema Híbrido *PM Propulsion System with PHIDrive by Scana*.....20

Motores de ímã permanente.....21

Vantagens gerais da propulsão elétrica.....22

3. GERAÇÃO NUCLEAR & TURBINA A GÁS

Histórico 23

Navios Nucleares 25

A Classe Nimitz 26

Turbinas a gás..... 27

CONSIDERAÇÕES FINAIS 30

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 36

ANEXOS – LEXUS SYNERGY DRIVE SYSTEM & TESLA.....37

Fatores favoráveis em Sistemas HíbridoS.....38

Sistema da Lexus.....39

Sistema da Tesla.....41

Introdução

A geração de energia elétrica a bordo é essencial para as operações de rotina de uma embarcação e vem sendo feita, principalmente, a partir da queima de combustíveis fósseis. Esse tipo de geração, levando-se em consideração a eficiência do conjunto, os custos para a instalação de seus subsistemas e a manutenção de seus equipamentos: cabos, tubulações, bombas, compressores, aquecedores, purificadores, troca de óleo lubrificante, número de peças móveis e fatores ambientais, percebe-se que esse tipo de geração torna-se cada vez mais dispendiosa e ineficiente para os padrões atuais.

Não se deve achar que exista uma visão ultrapassada do motor de combustão interna, mas procura-se mudá-lo de posição na praça de máquinas e diminuir suas atribuições a bordo, visando maior economia e melhor eficiência. A utilização de motores de combustão interna como fonte de energia, continuará como uma opção importante, mas não como a principal delas, e, ao mesmo tempo, cada vez mais auxiliada por motores elétricos acoplados e utilizando plantas de geração híbridas, como a diesel-elétrica, reatores nucleares e turbinas a gás.

Apesar de usar eletricidade em praticamente todos seus equipamentos, os meios de emergência a bordo ainda necessitam de combustível fóssil para funcionar. O gerador de emergência, e todos os sistemas a bordo que permanecem em *Stand by,* caso alguma falha ocorra, devem ser movidos a diesel. Uma vez em *Black out*, os principais controles devem permanecer operacionais para a segurança da embarcação em si e dos outros navios e plataformas ao seu redor. Não se admite ficar a deriva por falta de energia. É nesse ponto que se deseja chegar com a propulsão elétrica, colocar o motor a combustão como secundário (emergência) na operação das embarcações.

Este trabalho tem por objetivo mostrar outras formas de geração de energia elétrica as quais se mostram mais econômicas e ecologicamente mais sustentáveis que as atuais. Serão apresentadas a geração por sistemas híbridos (diesel-elétrico), através de reatores nucleares, comparação com o sistema existente (gasolina-elétrica) dos carros híbridos e por turbinas a gás.

Capítulo 1 - Os Sistemas Híbridos

Sistemas Híbridos

Antes de iniciar, colocam-se em destaque os seguintes conceitos que serão abordados: geração, eficiência, economia e custos. Entende-se como sistema híbrido um sistema que contenha mais de um meio de propulsão conjuntamente com equipamentos que armazenem significativas quantidades de energia.

Basicamente, todos os sistemas modernos de um navio dependem da eletricidade. Sistemas eletrônicos, atuadores hidráulicos controlados eletronicamente, computadores, motores elétricos, bombas, iluminação, sistemas de navegação entre outros. A eletricidade é de tal importância e valia que sua falta pára a operação de qualquer navio, ocasionando perda de tempo e dinheiro para armadores e para o próprio comércio. A geração deve ser de uma maneira tal que, além de energia, sejam obtidas segurança e confiabilidade durante as operações e viagens. Das diversas formas de geração elétrica a bordo, algumas se destacam por determinadas qualidades que tornam mais barato o produto final da atividade marítima, ou seja, o serviço prestado.

Os sistemas híbridos surgiram com o objetivo de unir a potência do motor à explosão com a eficiência do motor elétrico. Porém, alem da eficiência, percebeu-se que os motores elétricos podiam produzir mais potência e uma maior faixa de torque que os de combustão. Na moderna construção de motores elétricos, tem-se por objetivo a redução de peso, da massa inercial rotacional do conjunto e diminuição do atrito.

Um dos primeiros avanços na direção dos sistemas híbridos foi o desenvolvimento de uma transmissão para esse tipo de propulsão. Nos automóveis, a empresa Toyota™, em seu HSD (*Hybrid Synergy Drive*), trocou a transmissão normal de um automóvel de passeio por um sistema eletromecânico, chamado CVT (*Continuous Variable Transmission*). Um motor de combustão interna gera potência de maneira mais eficiente em uma curta faixa de rotação,

porem, um veículo é geralmente dirigido em uma ampla variedade de velocidades, sendo mais econômico e eficiente somente em uma pequena faixa desta.

Se formos analisar uma transmissão convencional, percebe-se que ela entrega diferentes razões discretas entre velocidade e torque. À medida que um motorista, operando um câmbio manual, passa as marchas à diante (1°, 2°, 3°...), diferentes razões de velocidade entre o eixo de transmissão (que é ligado as rodas) e o volante do motor (ligado ao virabrequim) são utilizadas, possibilitando as diversas "velocidades" para um automóvel. Dessa forma, o motor, em diversas ocasiões, passa a operar em uma faixa menos econômica e, conseqüentemente, mais onerosa.

A transmissão tipo CVT eliminou o problema da faixa de rotação mais econômica. Ela baseia-se no aumento ou diminuição do diâmetro de uma correia que conecta o eixo do motor com o de transmissão. Basicamente ela seleciona a melhor "marcha" (na verdade ela não possui nenhuma marcha fixa, somente determinados pontos no escalonamento cujas relações de rotação são mais utilizados) para a situação requerida, ajustada para a velocidade e potência desejada. Juntamente, essa transmissão melhora a durabilidade do conjunto e diminui seu desgaste, visto que o motor passa a operar sempre em sua faixa mais eficiente.

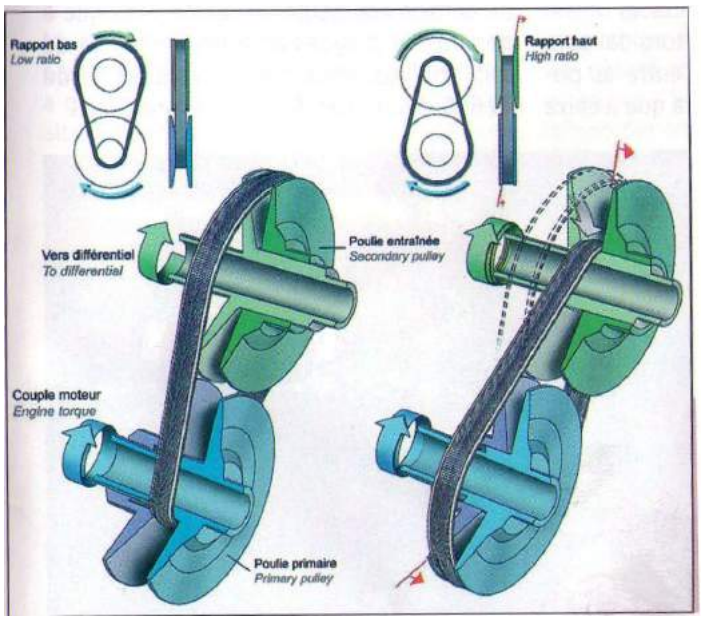


Figura 1 – Transmissão tipo CVT.

A inexistência de marchas possibilita o motor operar em sua rotação mais econômica, entre 1500 e 2000 RPM (rotações por minuto). Essa característica permite que o motor gere potência quando necessário sempre da forma mais eficiente, seja para carregar as baterias ou para acelerar. Existe conjuntamente um equipamento que desliga o motor quando o acelerador é menos exigido, deixando toda a carga sobre o motor elétrico.

Fluxo de Potência

No projeto de um automóvel padrão, o alternador (que recarrega a bateria em determinadas faixas de rotação) e o motor de partida (arranque) são considerados acessórios os quais são acoplados ao motor de combustão interna. A bateria é usada basicamente para dar a partida, fornecendo energia para o motor de arranque, e manter ligados os acessórios do veículo quando o motor está desligado. O sistema híbrido substitui ao mesmo tempo o alternador e o motor de arranque por dois motores com ímãs permanentes: um deles sendo o gerador/arranque e o outro o próprio motor elétrico. Ambos regeneram a bateria, mas somente o último fornece potência às rodas. Associados a eles tem-se inversores CC-CA, um distribuidor computadorizado de potência (divide a carga/esforço a ser distribuída(o) entre o motor a combustão e o elétrico) e baterias de alta capacidade para armazenamento de energia elétrica.

Figura 2 - Bateria de Íons de Lítio do modelo Toyota™ Prius 2013.

Como funciona

O sistema HSD funciona transferindo a energia acumulada na bateria para o motor elétrico e gerenciando o carregamento desta. Uma das vantagens do motor elétrico é sua curva plana de torque, estando disponível em qualquer faixa de rotação. Isso torna possível a operação do motor a explosão em sua faixa mais econômica, com menores emissões, ruídos e vibrações. De acordo com a posição do pedal do acelerador, o computador do carro coordena a distribuição de carga entre os motores. Caso maior potência seja necessária, mais energia é enviada ao motor elétrico. Sendo requerida potência total, ambos os motores (elétrico e combustão) entrarão em série para fornecer potência às rodas. Em outro cenário, no qual o veículo esteja em velocidade constante, o carro pode operar no modo totalmente elétrico, dispensando o motor de combustão interna. Ao mesmo tempo em que toda a computação ocorre, a reutilização de toda energia perdida na forma de calor dos freios e energia cinética das rodas é aproveitada para recarregar as baterias do sistema.

A combinação de desenho eficiente, sistemas regenerativos, desligamento do motor a combustão quando este não é necessário, reserva significativa de energia armazenada nas baterias e um eficiente motor de combusão interna de pequena cilindrada confere ao veículo HSD uma significativa vantagem econômica, principalmente dirigindo-se em trechos urbanos.

Fases de operação

O HSD pode operar nas seguintes fases :

- Carregamento da bateria: a bateria pode ser carregada sem o carro precisar se mover. Apenas extraindo energia elétrica do motor a combustão.
- Partida do motor de combustão
- Marcha à ré
- Ponto morto
- Modo elétrico: operando somente com energia elétrica.

- Regeneração através dos freios: alem de absorver o calor da frenagem, muitos sistemas utilizam o motor elétrico para simular uma desaceleração, e assim gerar energia para a bateria.
- Freio motor: o motor a combustão tambem pode realizar freio motor. Existe no cambio automático dos modelos híbridos (principalmente da Lexus™) uma posição chamada "B", de *Brake*. Nessa posição, o próprio peso do carro, descendo uma ladeira, por exemplo, gira o motor e carrega a bateria. Existem, portanto, dois tipos de freio motor, cada um deles com a capacidade de carregar as baterias.
- Potência extra: em situações de carga total no acelerador, o computador pode direcionar um pico de energia para o motor elétrico para gerar mais potência, como durante ultrapassagens em estradas.

Figura 3 - Modos de operação de um modelo Híbrido: Modo híbrido (*Hybrid Mode*), o qual utiliza normalmente o motor à combustão junto com o elétrico, Modo Elétrico (*Electric* Mode), e modo econômico (*ECO Mode*), no qual o motor a combustão trabalha juntamente com o elétrico, porem com uma menor participação com o objetivo de se economizar combustível).

Figura 4 - Alavanca de cambio do Toyota™ Prius 2013 (posição B no cambio).

Figura 5 - Modelo Híbrido sendo carregado em tomada de 120V ou 240V.

Problemas ambientais

Apesar dos carros híbridos consumirem menos combustível, surge o problema da reciclagem de suas baterias, as quais podem ser de dois tipos:

1. Hidreto de Níquel Metálico;
2. Íons de Lítio.

Ambas são menos agressivas ao meio ambiente que as baterias de chumbo, que são as mais utilizadas nos veículos convencionais. Em termos de toxicidade, grande parte das baterias apresenta componentes cancerígenos. As de íons de lítio, largamente utilizadas em aparelhos celulares, passaram a ser as preferidas em sistemas híbridos e chamaram a atenção por certas características:

1. Menor tamanho;
2. Menor peso;
3. Sem efeito memória;
4. Maior capacidade de carga armazenada;
5. Maior capacidade de corrente na saída (*Boost*);
6. Maior eficiência e durabilidade (semelhante a do veículo).

Utilização de materiais raros

As desvantagens na utilização de sistemas híbridos começam em suas baterias (acumuladores). Muitos dos custos dos sistemas híbridos recaem sobre os materiais utilizados na construção de suas baterias e motores. Muitos de seus componentes, principalmente dos motores elétricos, são feitos de elementos raros. Um deles é o *Neodímio (Nd)*, elemento essencial na construção de ímãs permanentes. Outro é o *Disprósio (Dy),* da série dos lantanídeos, também utilizado nos motores e no sistema de baterias. Sua manutenção, apesar de apresentar um sistema mecânico menos complexo: inexistência de caixas de reversão, óleo lubrificante do motor, número reduzido de partes móveis e maior durabilidade do sistema; apresenta elevados gastos quando é necessário repor as baterias velhas.

Capítulo 2 - Os Sistemas Híbridos em navios

Histórico

Os primeiros navios híbridos construídos (utilizam mais de uma fonte de energia), foram aqueles que possuíam velas conjuntamente com motores à vapor. Outro exemplo são os submarinos com propulsão diesel-elétrica, os quais, quando mergulhados, utilizam-se da energia elétrica armazenada em baterias e, quando na superfície, operam os motores a diesel para terem propulsão, ao mesmo tempo recarregando as baterias.

Atualmente, muitas embarcações menores se utilizam de propulsão híbrida para terem potência de manobra e energia elétrica a bordo. Tal qual como apresentado nos carros, esse tipo de sistema possui a vantagem da melhor eficiência aliada ao menor consumo de combustível. Porem, seus custos e manutenção são demasiadamente mais dispendiosos quando comparados a uma embarcação com propulsão convencional com motores de combustão interna.

O principal custo são as baterias e a manutenção do sistema. Também ocorre um substancial acréscimo de peso devido ao elevado número de baterias.

Como já mencionado, o controle de emissões forçou os fabricantes e projetistas de navios a desenvolverem novas soluções de propulsão para as diversas embarcações. Sistemas Híbridos consistindo de baterias, como no da Toyota™ / Lexus™, mostraram grande potencial, especialmente em embarcações do tipo rebocadores portuários. A economia e a gravidade dos impactos ambientais dependem fortemente de como o sistema é controlado. Modelos computacionais do sistema foram construídos para comparar diferentes estratégias de controle, e assim fornecer suporte para as decisões quanto ao projeto do sistema.

Composição do sistema

No sistema convencional, a parte da geração fica separada da propulsão, a qual consiste geralmente de dois motores principais (bombordo e boreste). Analisando um problema semelhante na motorização dos carros, a indústria automobilística, abordando o problema de diferentes maneiras, viu como uma possibilidade a utilização de sistemas híbridos. Um deles chama-se sistema híbrido em paralelo. Utilizado em carros, passou a ser aplicado em embarcações. Sua função principal é auxiliar o motor principal de combustão interna na propulsão da embarcação, tornando seu uso mais eficiente e diminuindo emissões. Outra forma de sistema híbrido é a propulsão totalmente elétrica, no qual a geração da energia é feita por motores de combustão, turbinas ou reatores, e a propulsão em si fica a cargo de motores elétricos que utilizam essa energia previamente gerada ou armazenada.

De qualquer forma, alem da suposta economia do sistema, ocorreu também a sua simplificação. Foi reduzido o número de peças móveis, engrenagens, caixas de redução, de inversão, óleos lubrificantes entres outros componentes foram retirados de dentro das embarcações, contribuindo de forma positiva para a redução do peso (não contando a adição de baterias).

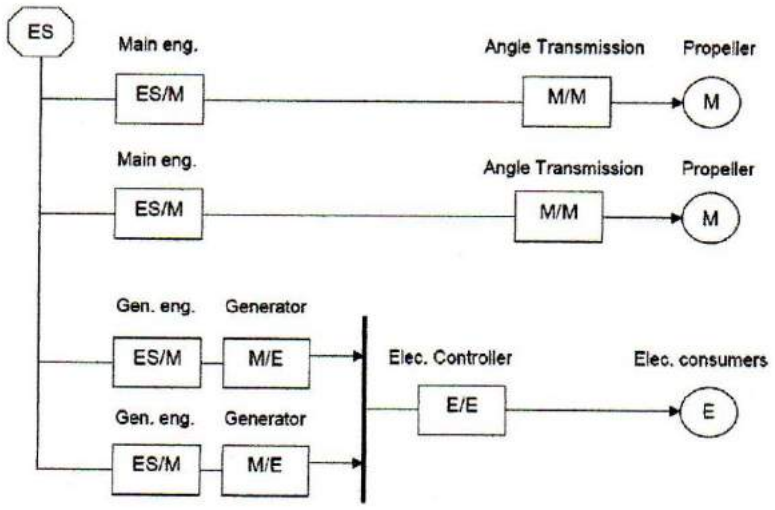


Figura 6 – Esquema da propulsão e geração de energia em uma embarcação convencional. Propulsão separada da geração.

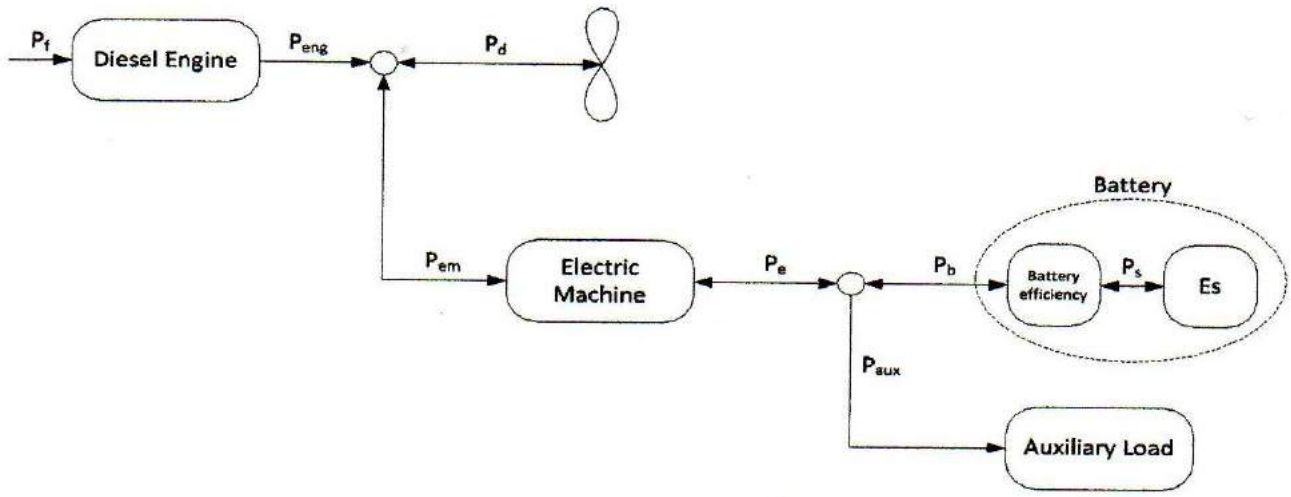


Figura 7 – Esquema de um Sistema Híbrido em Paralelo. Auxílio de motor elétrico na propulsão, diminuindo a carga sobre o motor a combustão.

Uma parte da energia mecânica gerada pelo motor a diesel, é utilizada diretamente para a propulsão da embarcação, enquanto que a outra parte é usada para carregar as baterias. Quando necessário, o motor elétrico auxilia o motor a diesel na propulsão, contribuindo para o menor uso de combustível.

A aplicação dessa tecnologia em navios depende principalmente do tipo de operação deste. Para embarcações que possuam demanda de energia caracterizada por picos de pouca duração e longos períodos com rotação constante e pouca carga (esforço), o sistema híbrido atende com a devida eficiência os requisitos. Tais tipos de navios compreendem: Iates, Dragas, Rebocadores, Navios de Apoio Marítimo, Navios de Cruzeiro entre outros.

Distribuição de energia

A correta distribuição de energia em tempo real e suficiente para atender plenamente a demanda das operações, consiste em um grande desafio. A dificuldade recai em quantificar a energia requerida para o próximo passo da operação, pois essa é uma variável não conhecida na equação de demanda. Por falta de conhecimento antecipado sobre a futura demanda, a estratégia de gestão de energia a bordo deverá prever qual será essa demanda e, utilizando-se de conceitos já provados pela indústria automotiva, construir uma função de demanda baseada no tipo de planta de geração de energia e sua capacidade instalada. Essa função de demanda se refere à ECMS (*Equivalent Consumption Minimization Strategy*).

ECMS

A configuração híbrida levanta a questão sobre a estratégia de gerenciamento de energia, o qual seleciona a potência requerida entre as duas plantas disponíveis. A estratégia de minimização do consumo equivalente busca avaliar o consumo de energia elétrica drenada da bateria com o consumo em combustível pelo motor a combustão, com o objetivo de se poder comparar o consumo de ambos.

O consumo de energia elétrica da bateria é transformado em um equivalente consumo de combustível para se poder fazer a comparação. Se alguma energia é drenada da bateria em determinado tempo, ela deverá ser recarregada para manter o estado de carga no futuro. Essa energia de recarga será providenciada pelo motor a combustão ou a partir da energia coletada durante uma frenagem (freios regenerativos). De qualquer maneira, isso implicará em um gasto extra e combustível, o qual é designado como o consumo em combustível da bateria.

Com a introdução do consumo do motor a combustão e o da bateria no algoritmo de otimização, o qual está integrado ao controle eletrônico de distribuição de carga entre os motores, a melhor distribuição da potência requerida entre os motores à disposição é calculada e, dessa maneira, obtêm-se o menor consumo de combustível e a melhor eficiência para o sistema.

Propulsores Elétricos

Basicamente, os propulsores elétricos foram criados como uma alternativa aos que utilizam combustíveis fósseis para gerar potência. Diferentemente desses últimos, os elétricos possuem diversas vantagens e desvantagens. Dentro dos principais fabricantes de propulsores, serão listadas e apresentadas a seguir as características, diferenças, vantagens e desvantagens dos sistemas.

Após a segunda guerra mundial, rebocadores de alto mar foram produzidos com um arranjo de propulsão similar aos de propulsão elétrica atualmente. Possuem a vantagem de permitir variações suaves, pequenas e precisas na rotação do eixo propulsor, característica muito importante em fainas de reboque e salvamento.

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

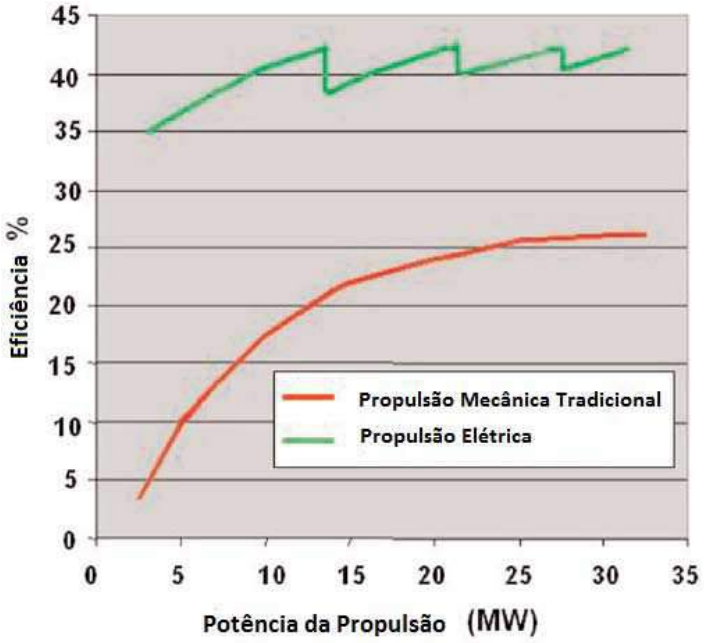


Figura 8 – Diagrama de eficiência no consumo em relação a carga na propulsão.

Azipods™

No inicio da década de 1990, surgiu o sistema de propulsão elétrica Azipod™ no qual o motor elétrico, responsável pela propulsão, fica instalado dentro de um POD (*Podded Drive*), o qual permanece dentro da água. Foi considerado de concepção revolucionária, porem, teve sua origem a partir dos primeiros submarinos híbridos. Com sua montagem submersa, se ganha em espaço interno na embarcação, com uma melhor distribuição e aproveitamento dos espaços de máquinas e carga, melhor refrigeração do motor, menor nível de ruído e vibração, menor tempo de indisponibilidade, maior segurança, redundância e contribui para manter o centro de gravidade do navio o mais baixo possível.

Seu principio é a substituição do hélice com eixo fixo, que produz uma força sempre na direção longitudinal, por um propulsor que pode mudar o sentido de sua corrente de descarga, dirigindo sua força para qualquer ponto do azimute da embarcação. O fato de não precisar de

um leme para governar também reduz o peso da embarcação e o número de partes móveis, pois o propulsor, com sua atuação de 360 graus, executa essa função.

Este motor é acoplado a um eixo no qual está ligado um hélice. Também existe a configuração na qual o motor elétrico ainda encontra-se dentro das obras vivas da embarcação, sendo necessário um pequeno eixo de transmissão (*L-Drive ou Z-Drive*) para transmitir o movimento para o hélice na extremidade do casulo.

Na manutenção desses propulsores, as inspeções podem ser realizadas internamente a estes, facilitando assim um diagnóstico mais elaborado de problemas.

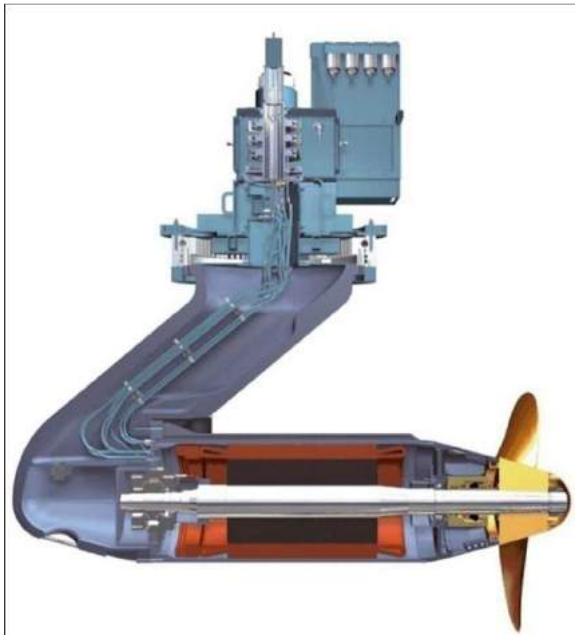


Figura 9 – Propulsor Azimutal.

Siemens Schottel™

Semelhante ao sistema Azipod™, o sistema Schottel™ também pode girar 360^0 em torno do seu eixo e utiliza propulsor elétrico para mover suas pás. Porém, alem de possuir um par de hélices gêmeas, a instalação de seus motores propriamente ditos se faz principalmente dentro da praça de máquinas. É um sistema de propulsão que difere principalmente no tipo da carcaça do motor elétrico.

Os dois pilares do SSP (*Siemens Schottel Propulsion*) são a tecnologia do *Schottel Twin Propeller*™ e o motor permanentemente excitado (PEM) da Siemens, o qual utiliza ímãs permanentes, tal qual nos veículos híbridos.

Figura 10 – Propulsores Schottel.

Voith Schneider™

No inicio dos anos 50 foram desenvolvidas as primeiras embarcações com esse sistema de propulsão, o qual está enquadrado dentre os sistemas de propulsão não convencionais. Utiliza-se um motor elétrico instalado na praça de máquinas da embarcação que se assemelha muito com os últimos dois tipos de propulsores mostrados. Diferentemente, o Voith Schneider™ não possui um hélice convencional. Sua principal vantagem é a rápida mudança de direção da tração gerada pelo movimento de suas pás dispostas verticalmente, sendo apenas necessário a mudança de seu ângulo de ataques.

Figura 11 – Propulsor Voith Schneider.

Dentre as vantagens podem ser citadas:

1. Pode atuar para avante ou para ré com a mesma força de tração;
2. As alterações do sentido da aplicação e da intensidade da força podem ser feitas rapidamente, conferindo melhor manobrabilidade em espaços restritos.
3. Atua fora do campo da esteira da embarcação, evitando trepidações e cavitação intermitente.

Dentre as desvantagens podem ser citadas:

1. Grande calado (além das lâminas, há uma estrutura que protege cada propulsor e funciona como direcionador do fluxo de água);
2. O formato do fundo do casco, reto e largo, pode prejudicar a hidrodinâmica, dificultando a operação em mar aberto ou em alta velocidade;
3. Relação entre tração estática e potência do motor inferior a de outros sistemas de propulsão.
4. Maior custo

Sistema Híbrido *PM Propulsion System with PHIDrive by Scana*

A Scana apresentou, na Feira *Navalshore* ocorrida no Rio de janeiro em agosto de 2013, um sistema de propulsão compacto e eficiente de motores de ímãs permanentes o qual, combinado com geradores diesel, compõe uma planta híbrida.

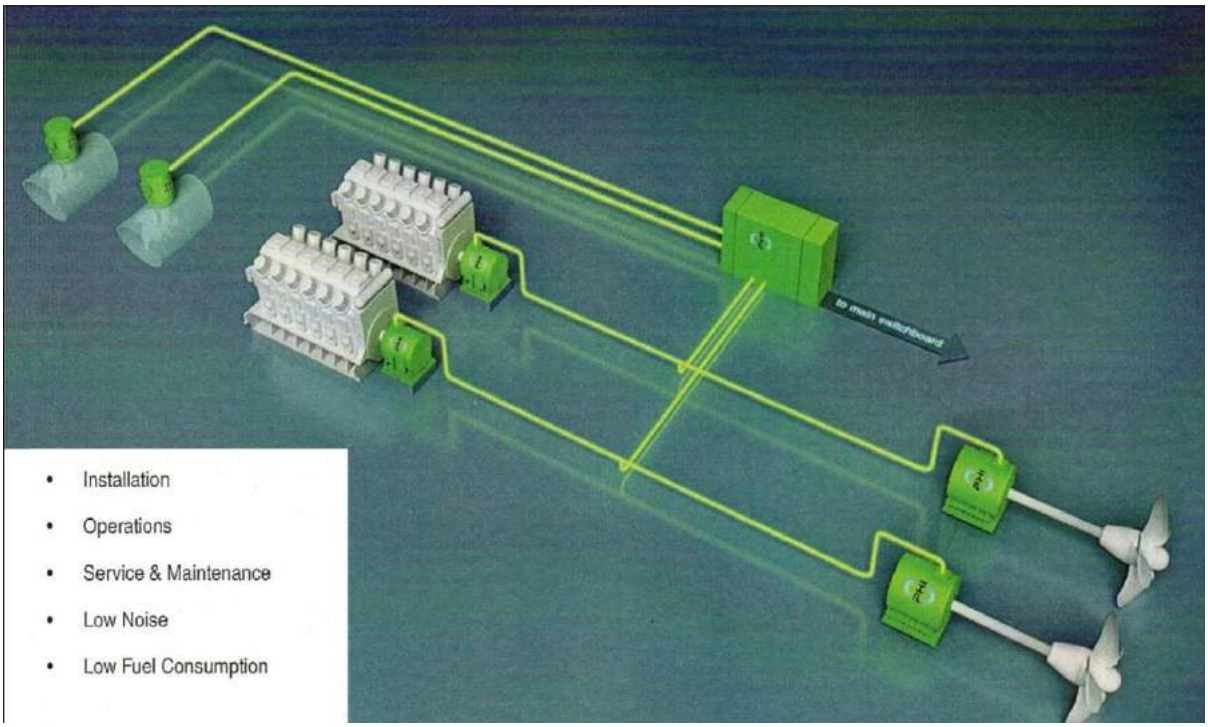


Figura 12 – Esquema da propulsão hibrida Scana.

Figura 13 – Perfil compacto do motor PHIDrive.

Motores de íma permanente

É o tipo de motor elétrico mais eficiente. Dentre suas vantagens podem ser citadas:

- Baixo peso e pequeno volume;
- Baixa inércia ⇒ alta relação torque/inércia;
- Alto torque ⇒ alta relação torque/peso;
- Inúmeros fabricantes e modelos ⇒ muitos modelos de motoredutor (redutor já acoplado ao motor) ⇒ existem motores com praticamente qualquer torque-velocidade-potência;
- Atingem altas velocidades e acelerações;

Dentre as desvantagens desse tipo de motor tem-se:

- Acionador com eletrônica sofisticada.
- Motor e acionador tem alto custo.

Seu rotor é composto por:

- Imãs permanentes;
- Uso de materiais não ferromagnéticos (resina, fibra de vidro);
- Eliminação das bobinas do rotor para geração do campo magnético.

- Uso de imãs permanentes (terras raras – Nd–Fe–B ou Sm–Co) ao invés de bobinas para geração do campo ⇒ aumento do campo magnético:
- Grande redução do momento de inércia e peso aliado a um alto campo magnético.

Seu estator é composto por eletroímãs:

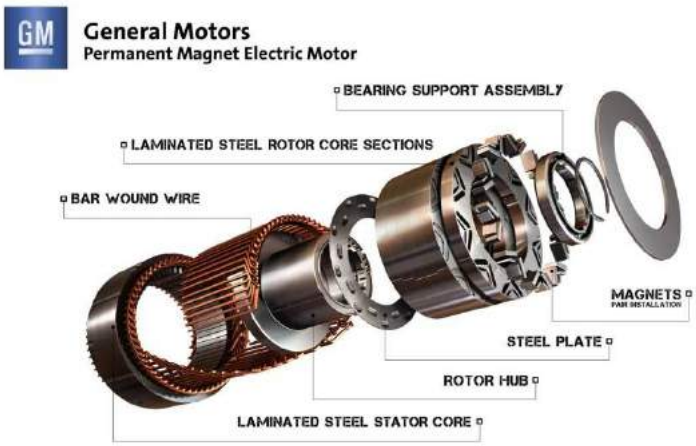


Figura 14 – Esquema de motor de ímã permanente.

Vantagens gerais da propulsão elétrica

1. - Excelente controle de velocidade e torque em toda faixa de velocidade;
2. - Facilidade para adoção de controles automáticos e remotos;
3. - Flexibilidade do Projeto;
4. - Favorecimento das redundâncias dos sistemas;
5. - Redução dos Custos de Manutenção;
6. - Redução da Emissão de Poluentes;
7. - Redução do ruído do motor e da vibração transmitida do eixo ao hélice; e
8. - Flexibilidade no gerenciamento da distribuição da potência em operações normais e rápida recuperação após a detecção de defeitos (incêndios, alagamentos e outros tipos de falhas).

Capítulo 3 – Geração Nuclear & Turbina a gás

Histórico

Um reator nuclear gera energia elétrica à partir do calor gerado pela reação de fissão (quebra de átomos) que ocorre em seu interior, diferentemente das estações de energia convencionais, que produzem calor queimando combustível. Esse calor é usado produzir vapor e girar uma turbina, a qual é conectada a um alternador, gerando energia elétrica.

Existem muitos projetos de reatores nucleres e muitos são utilizados para a produção de energia em terra firme, principalmente em países da Europa, como a França, a qual tem mais de 80% de sua eletricidade de origem nuclear, e nos Estados Unidos. O tipo mais utilizado em embarcações atualmente é o do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). O reator em si é composto por um circuito primário, no qual água pressurizada é mantida em contato com o combustível nuclear, permanecendo no estado líquido e servindo de elemento refrigerante dos elementos combustíveis, que contêm o material radioativo em fissão (óxido de urânio). Através de um trocador de calor, ocorre a transmissão da energia calorífica produzida para a água a ser vaporizada, que vai para uma turbina (circuito secundário), onde é produzida a eletricidade. Foi o reator mais patrocinado pelos Estados Unidos, tem segurança intrínseca (pois possui circuitos fechados), não torna radioativa a turbina e é um dos tipos mais seguros de reator nuclear.

Para produzir o equivalente em uma usina termoelétrica são consumidos em combustível e produzidos em CO_2:

Combustível fóssil consumido	**CO_2 emitido**
2.500 toneladas de carvão mineral	7.200 toneladas
1.955 toneladas de óleo combustível	5.760 toneladas
1.172 toneladas de gás natural	3.216 toneladas

A fissão de 1 kg de ^{235}U libera $2{,}3.10^7$ kWh. Em 24h serão 1000 MW(t).

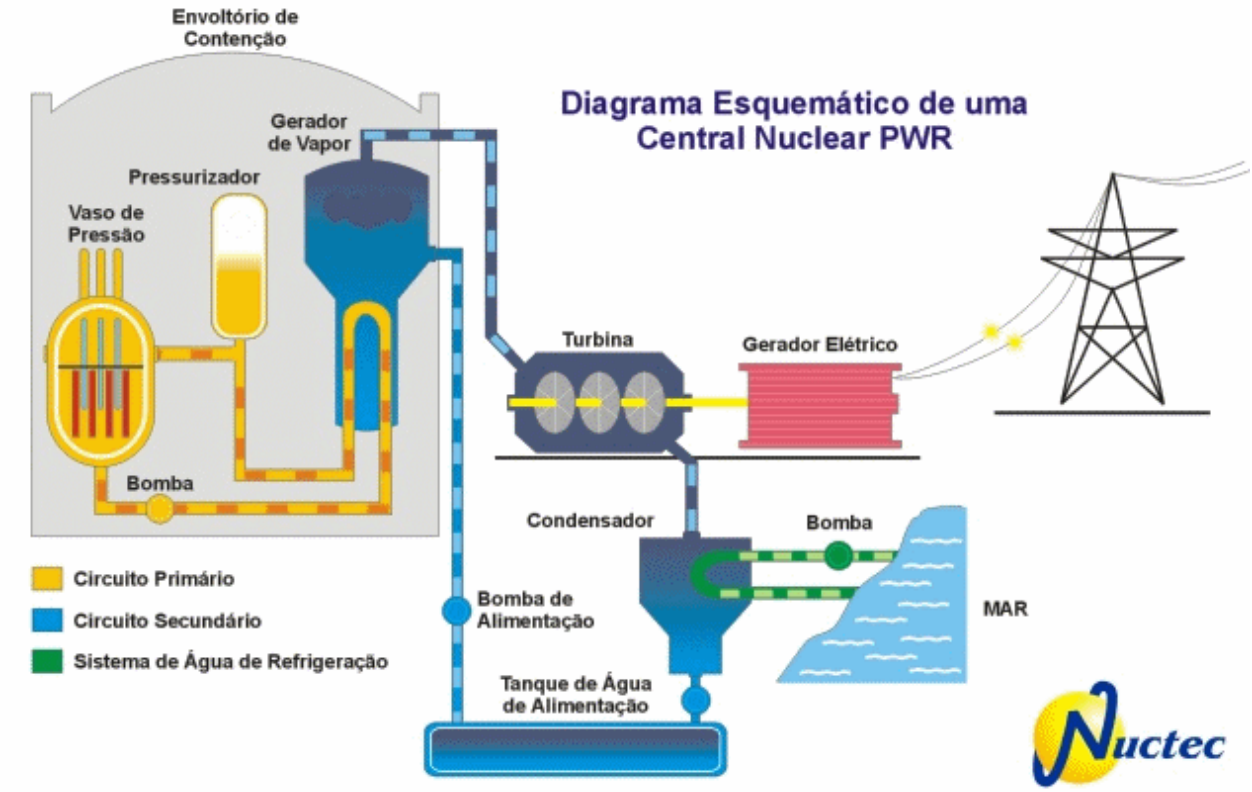


Figura 15 – Esquema de um retaor PWR.

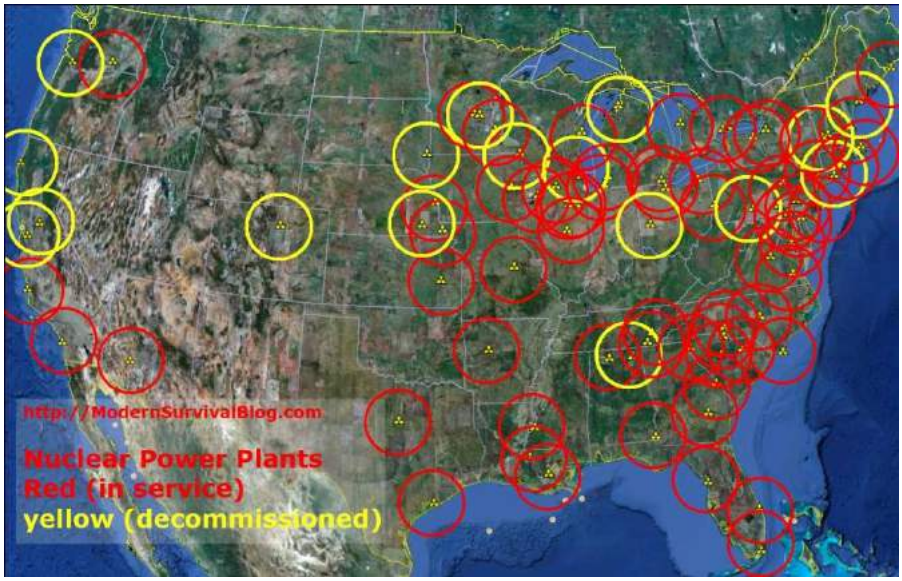


Figura 16 – Uso da energia nuclear nos Estados Unidos.

Navios Nucleares

Quando lançado em 1967, o quebra gelo russo NS Lênin foi o primeiro navio civil com propulsão nuclear do mundo. Ele foi colocado em serviço em 1959 e possuía três idênticos reatores PWR, cada um com 1,6 metros de altura, 1 metro de diâmetro, com potência máxima de 90 MWh, resultando em 44000 HP. Utilizando Urânio enriquecido como combustível (dos 800 kg, 85 kg eram de U-235, o urânio físsil) e água destilada como elemento refrigerante, o calor gerado pela reação em cadeia controlada era usado para gerar vapor, e esse vapor para girar uma turbina e produzir energia elétrica.

Figura 17 – Quebra gelo Lênin, atualmente atracado no porto de Murmansk, Rússia.

O Lênin, inicialmente com três reatores do tipo OK-150, teve dois acidentes nucleares em seu tempo de serviço. O primeiro ocorrido em fevereiro de 1965. Após ser desligado para reabastecimento, os elementos refrigerantes foram removidos e, como conseqüência, algumas barras de elemento combustível derreteram e se deformaram dentro do reator. Isso foi descoberto quando os elementos combustíveis gastos estavam sendo substituídos para armazenamento e processamento. 124 barras de combustível (cerca de 60% do total) ficaram presas dentro do núcleo do reator. Ficou decidido que o combustível e a grade de controle seriam removidos como um todo para ser descartado. Após armazenado por dois anos, foi despejado na baia Tsivolki (Novaya Zemlya Archipelago) em 1967.

O segundo acidente foi um vazamento no sistema de refrigeração, ocorrido em 1967, logo depois do abastecimento. Para encontrar o vazamento no sistema foi necessário quebrar através do escudo de concreto e metal que protegia a tripulação contra a radiação. Uma vez que o vazamento foi encontrado, percebeu-se que o dano causado pelo referido reparo não podia ser consertado. Conseqüentemente, todos os três reatores foram removidos e substituídos por dois reatores OK-900, o que foi completado no início de 1970.

A Classe Nimitz

A classe Nimitz é constituída por dez super porta-aviões, movidos por energia nuclear, ao serviço da Marinha dos Estados Unidos. O uso da energia nuclear proporciona uma autonomia ilimitada, sendo reabastecidos a cada 20 a 25 anos de vida útil operacional.

Todos eles são propulsionados pelo reator naval de 4ª geração A4W projetado e fabricado pela Westinghouse Electric Corporation. Este reator de água pressurizada desenvolve cada um o equivalente a 550 MW de potência, gerando o vapor necessário à propulsão do navio, para alimentar as quatro catapultas para o lançamento das aeronaves e produzir toda a eletricidade de bordo. O sistema é completado por quatro turbinas alimentadas pelo vapor produzido pelos reatores, as quais transmitem a potência produzida aos quatro hélices.

Figura 18 – Porta aviões Classe Nimitz.

Turbinas a gás

A geração a partir de turbinas a gás esta se tornando cada vez mais comum na indústria naval. Basicamente, uma turbina dessas comprime somente 20% de todo o volume de ar que entra por sua abertura dianteira. Esses 20% passam por diversos estágios de compressão até chegar à câmara de combustão, onde o combustível é adicionado e queimado, elevando a temperatura e a pressão e gerando o empuxo na parte traseira da turbina. A idéia de se utilizar turbinas na geração de energia a bordo tornou-se possível a partir do momento que se conectou a saída da turbina a um alternador. Devido às elevadas RPM alcançadas pelas turbinas, uma enorme quantidade de energia pode ser gerada (o modelo mais potente da Rolls-Royce, a MT-30, é capaz de gerar 36 MW de energia).

Vantagens

- Peso reduzido, sendo possível de serem instaladas em compartimentos elevados da embarcação;
- Grande geração de energia elétrica;
- Materiais de alta resistência, criados para suportar as extremas condições de vôo e resistir às altas temperaturas em seu interior resultante da combustão;
- Grande durabilidade;
- Alta confiabilidade e
- Economia de combustível devido à maior eficiência, quando comparada com a gerção por motores a combustão.

Figura 19 – Turbina Rolls-Royce MT30 sendo instalada em porta aviões Britânico.

Figura 20 – Palhetas dos diversos estágios de compressão do ar no interior da turbina.

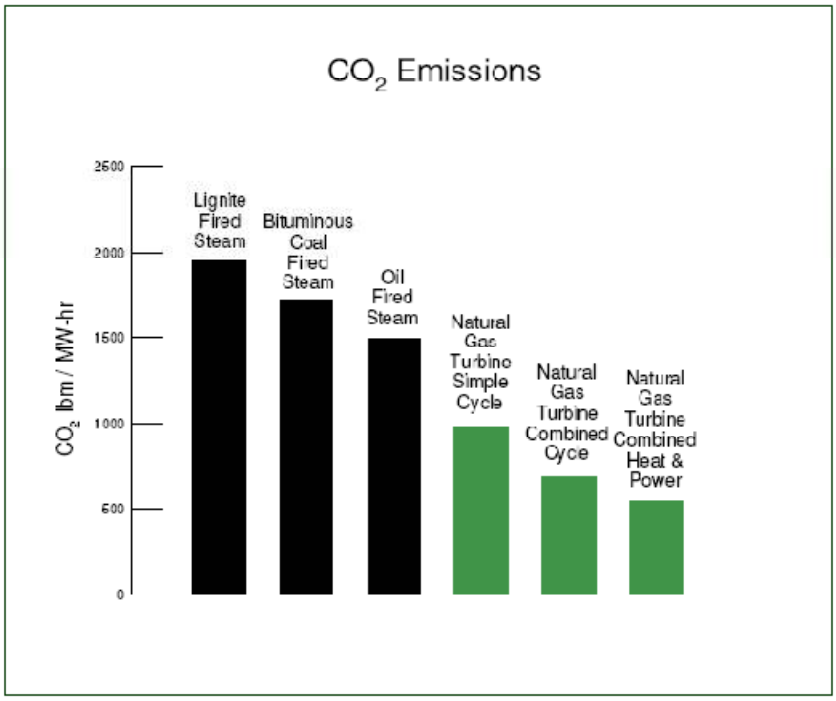
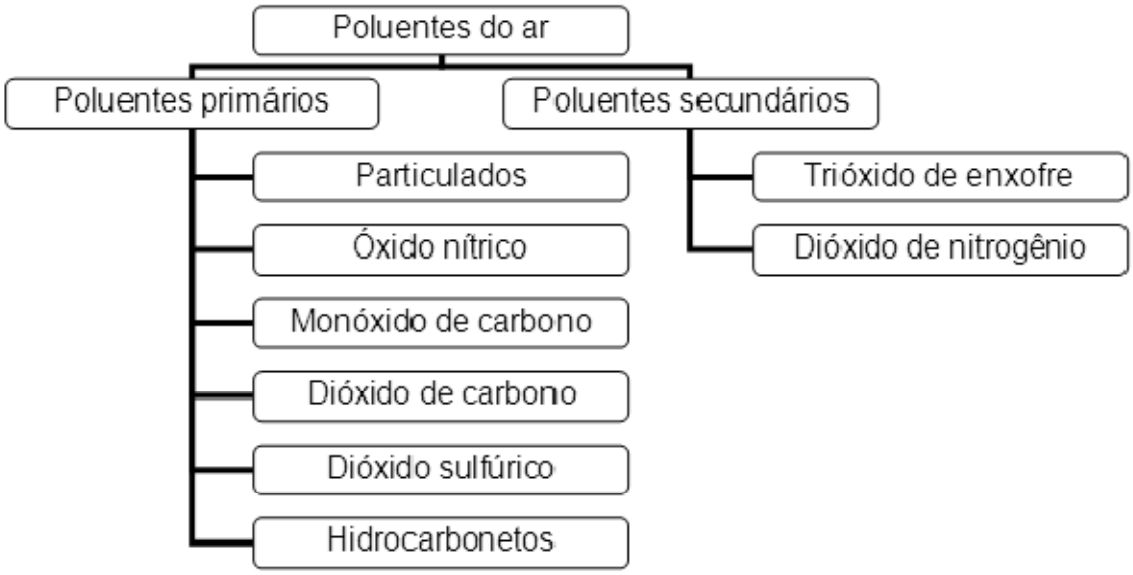


Figura 21 – Comparação de emissão de CO_2 entre diversos meios de geração de energia.



Figuras 22 – Poluentes emitidos por turbinas a gás

Considerações Finais

No tema geração de energia e propulsão não existe uma resposta definitiva sobre o melhor tipo a ser utilizado, depende da utilização que se dará à embarcação. Tanto os sistemas híbridos como os convencionais continuam a ter a sua importância. Caso a utilização da embarcação atenda a certos critérios, torna-se mais adequado um determinado tipo de geração de energia e de propulsão.

Existem, entretanto, comparações de plantas convencionais com híbridas, as quais confirmam a melhor eficiência do conjunto de geração e propulsão mista, sendo a convencional deixada para a parte de geração de emergência

Como pode ser observado, os temas geração de energia e propulsão não são questões plenamente resolvidas. Poderão coexistir vários sistemas de geração de energia e de propulsão, cada um deles aplicado a um ou mais casos específicos, onde são levados em consideração os desempenhos técnicos, a eficiência do sistema, os custos de instalação, operação e manutenção, a tecnologia envolvida e ainda os impactos ambientais. Tudo isso visando maior segurança, maior conforto, menores custos e, sobretudo atender às normas internacionais.

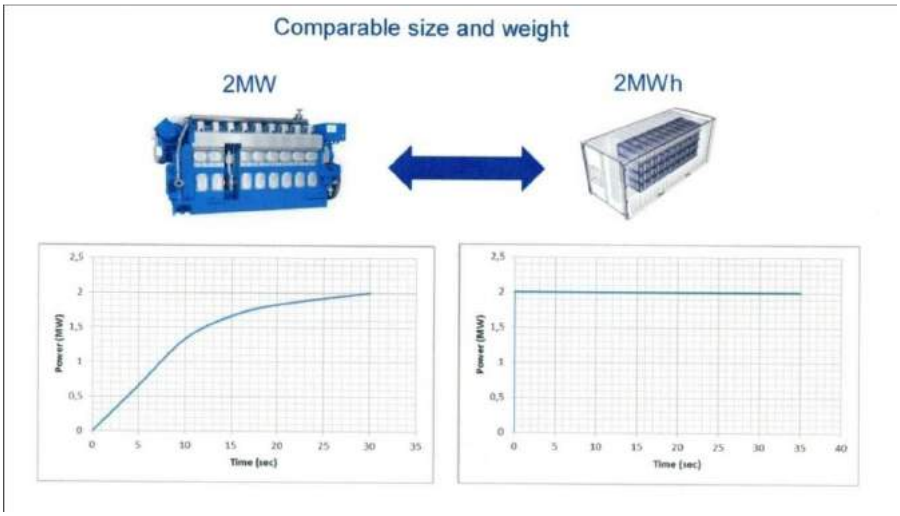


Figura 23 – Comparação entre o tamanho e peso das plantas de energia convencional e híbrida.

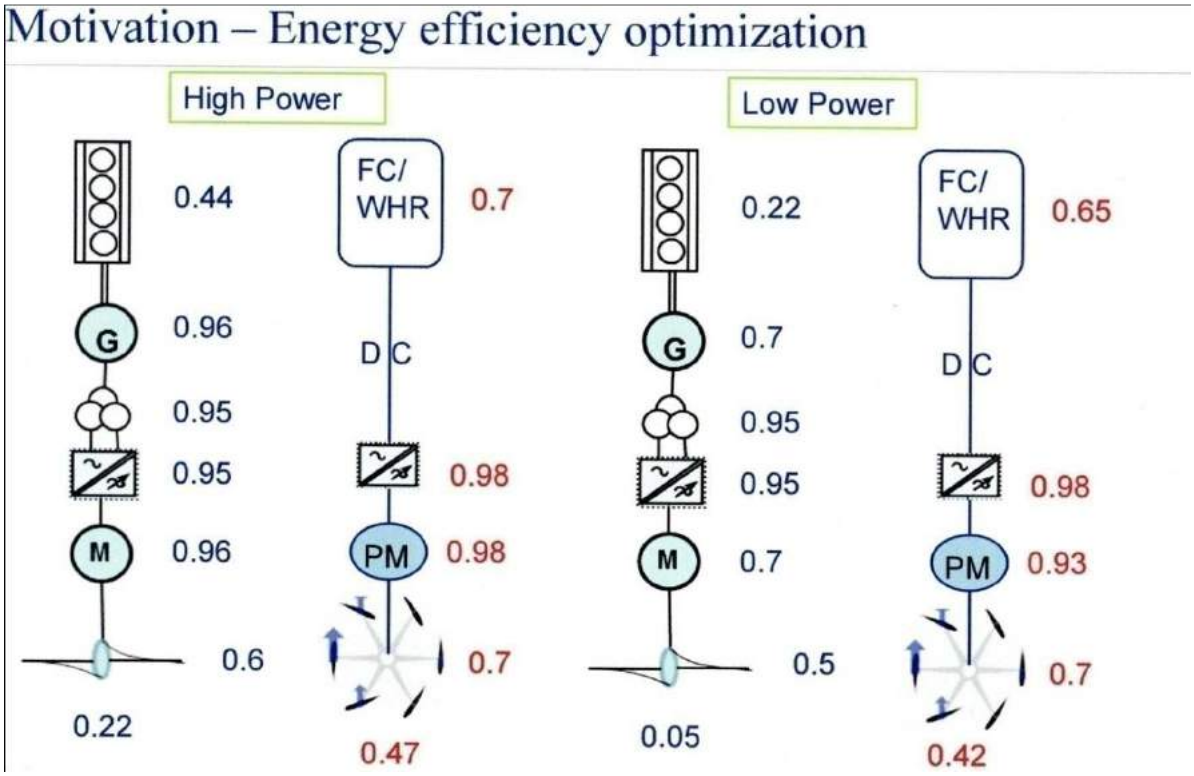


Figura 24 – Quadro de eficiência (em percentagem), comparando uma planta convencional com uma híbrida.

Emissões de um motor convencional em funcionamento:

Gás	**Percentagem/Concentração na exaustão**
O_2	13,0%
N_2	75,8%
CO_2	5,2%
H_2O	5,35%
NO_x	1500 ppm
SO_x	600 ppm
CO	60 ppm

Comparação entre navio híbrido e carro híbrido em termos da economia gerada em sua utilização:

Navios Híbridos	**Carros Híbridos**
Economia de combustível = 20%	Economia de combustível = 20%
Redução na emissão anual de CO_2 = 3000 t	Redução na emissão anual de CO_2 = 0,5 t
Redução na emissão anual de NO_x = 50 t	Redução na emissão anual de NO_x = 0,5 kg
Custo relativo de implementação do sistema = 4%	Custo relativo de implementação do sistema = 25%
Retorno do investimento de volta < 2 anos	Retorno do investimento de volta > 15 anos

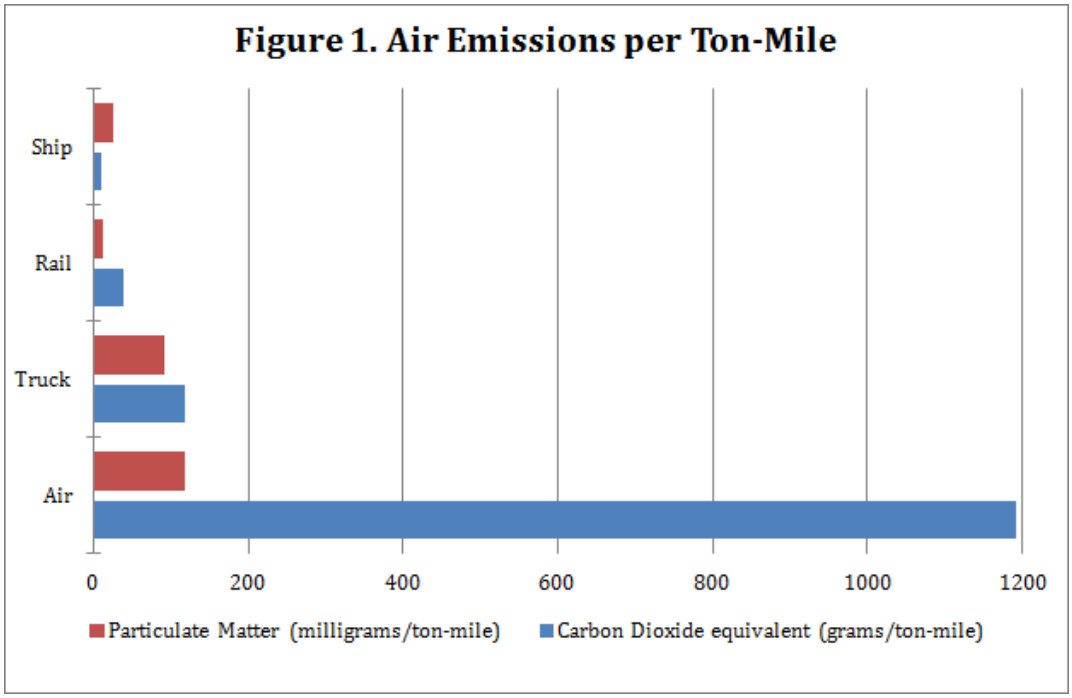


Figura 25 – Emissão de partículas e CO_2 nos diversos meios de transporte.

Tanto o sistema nuclear, a turbina a gás e o diesel-elétrico, todos sistemas de geração/propulsão híbridos, atendem a uma grande versatilidade de operações de rotina e viagens de longo curso. Cada uma delas, dependendo do tipo de uso da embarcação, se adapta melhor a um tipo de atividade na marinha mercante.

A geração combinada de energia proporciona melhor eficiência, maior produção e menor poluição do sistema. Mesmo com seu custo inicial mais alto, o investimento em matérias de melhor qualidade que são utilizados nesses sistemas, o já comprovado suscesso do sistema nos automóveis e a economia gerada a longo prazo torna o sistema híbrido o próximo sistema básico e padrão nas embarcações modernas na área *Offshore*. Na parte dos navios de longo curso, sua utilização torna-se um problema devido às longas viagens, as quais requerem grande quantidade de combustível, sendo o diesel um dos mais caros entre eles.

A Utilização de energia nuclear a bordo de navios mercantes torna-se uma solução para tornar mais barato o custo operacional e os gastos com municiamento da praça de máquinas e manutenção de seus diversos itens. A também simplificação dos sistemas do navio, não na parte eletrônica, e sim na mecânica, contribui para o melhor funcionamento, menor peso e menor custo de manutenção da embarcação. Uma desvantagem desse sistema é no momento do reabastecimento e descarte do combustível exaurido, o que pode gerar um problema ambiental grande, porem controlável, utilizando-se do armazenamento em tambores para posterior descarte.

A turbina a gás, muito utilizada na geração de energia a bordo de navios de guerra e navios de passageiros, também se encaixa para geração a bordo de navios mercantes, ainda sendo uma fonte de energia leve e durável. Uma desvantagem é o alto consumo desse sistema. Torna-se realmente viável em instalações que possuam fornecimento constante de combustível, tal como as plataformas *Offshore*, as quais utilizam muito esse tipo de geração a bordo. Em navios mercantes, sua principal vantagem esta na grande quantidade de energia gerada, redução de peso e simplificação da planta energética do navio.

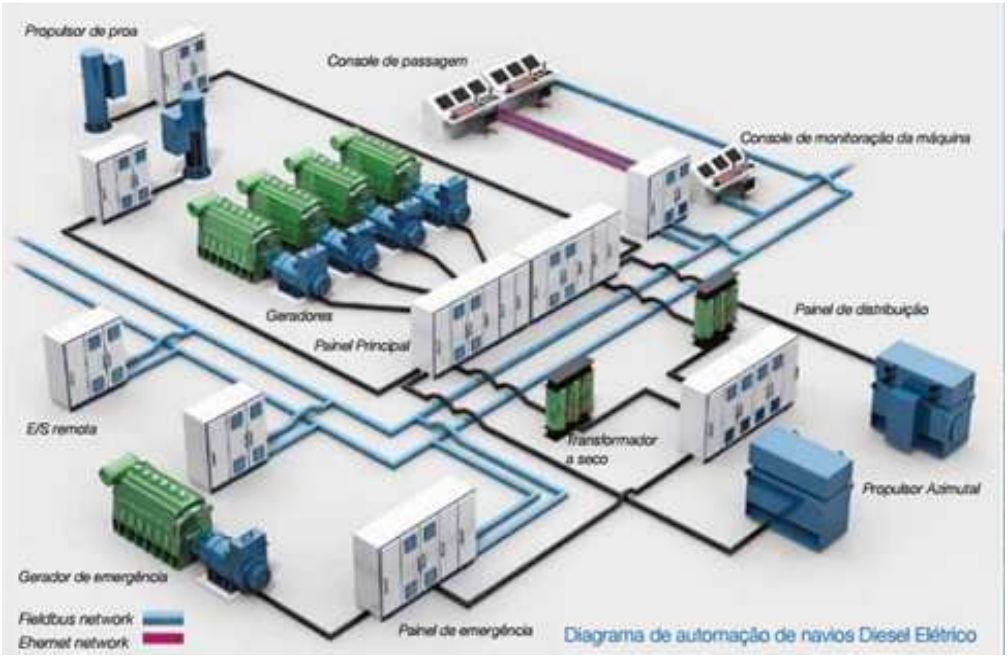


Figura 26 – A característica principal do sistema Híbrido é que não há MCP, somente geradores diesel-elétricos fornecendo a energia para a embarcação.

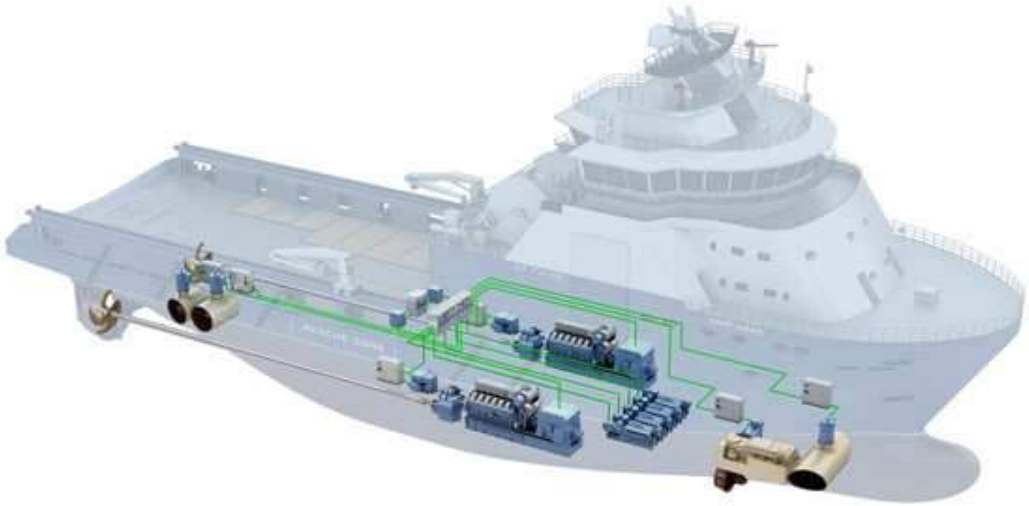


Figura 27 – Sistema Híbrido em uma embarcação *Offshore.*

Para a conclusão do trabalho, uma solução para os navios mercantes seria uma propulsão totalmente elétrica juntamente com a geração nuclear ou com turbina a gás. Devido a sua lotação e número mais reduzido de sistemas operando, quando comparado a um navio de cruzeiro, um navio mercante tem uma demanda de energia muito menor. Devido a isso, a implementação de turbinas menores e que consumam menos combustível é uma alternativa viável e real para esses navios. Tais turbinas podem ser modificadas para consumir mais de um tipo de combustível, sendo versáteis o suficiente para tornarem-se econômicas e viáveis em viagens de longo curso. A Geração nuclear esbarra na questão ambiental. Mesmo sendo de longe o sistema com as melhores vantagens: custo, combustível, economia, autonomia e manutenção. Ele sofre com o problema de descarte de seus elementos combustíveis, o que o torna a segunda melhor opção quando se fala em geração de energia a bordo.

Dados de comparação

Um reator nuclear moderno produz **550MW**

Uma turbina a gás produz **36MW**

Utilizando-se de uma expressão popular: “Um reator nuclear gera muita energia para pouco navio”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

http://www.nipeunicamp.org.br

http://smseletro.blogspot.com.br

http://www.transportabrasil.com.br

http://redenacionaldecombustao.org/

http://www.dnv.com

http://sites.poli.usp.br

http://www.netcarshow.com

http://www.lexus.com

http://www.tesla.com

ANEXO – LEXUS SYNERGY DRIVE SYSTEM & TESLA

Lexus Synergy Drive System & Tesla

Umas das primeiras empresas a mostrar um sistema híbrido que acopla um motor a gasolina com um elétrico no ramo de transportes (automobilístico) foi a Lexus™, com o HSD (*Hybrid Synergy Drive*), o qual equipa seus carros híbridos até hoje.

A utilização da planta híbrida para geração de energia se deu inicialmente de maneira comercial nos carros. O primeiro modelo que realmente viabilizou de forma econômica e logisticamente possível a planta híbrida foi o Lexus RX400h™, de 2005. Fabricado pela empresa japonesa Lexus™, marca de luxo da também japonesa Toyota™. Esse modelo foi o primeiro automóvel híbrido de sucesso e, como já dito, comercialmente viável, vendido no mercado mundial. "*It was the world first full hybrid crossover".*

Fatores favoráveis em Sistemas Híbridos

Custos x potência x peso x confiabilidade x durabilidade.

A planta híbrida fornece diversas vantagens, sendo a terceira mais importante a economia de combustível. Aumentar a autonomia do automóvel é a segunda da lista. A primeira foi à necessidade de desenvolvimento para o sistema híbrido de outras formas de geração de energia elétrica para carregar as baterias e fechar o ciclo do sistema. Alguns desses desenvolvimentos foram: o aproveitamento da energia cinética das rodas, a absorção do calor gerado pelo atrito dos discos de freio com as pinças, a reciclagem dos gases do escapamento do motor a combustão (*Exhaust Heat-Recovery System)* entre outros. Com esses adventos e contínuo aperfeiçoamento, a confiabilidade e durabilidade do sistema chegou a tal nível que, no Japão, chegou a ser líder de vendas da categoria, a frente de carros convencionais com somente motor a combustão.

Na parte mecânica, foram desenvolvidos novos materiais para construção de blocos e cabeçotes, tais como alumínio, titânio e outras ligas metálicas, com o objetivo de reduzir o atrito interno e o peso (diminuir a potência perdida em forma de calor), melhorar a transferência de calor gerado para fora do motor (melhor arrefecimento). Alem disso, a associação com um motor elétrico forneceu mais potência e torque ao conjunto, visto que um motor elétrico tem menor massa inercial e torque máximo em toda a faixa de rotação. Em veículos totalmente elétricos, como o Tesla S Model™ 2013, o peso é ainda mais reduzido, pois não há necessidade de cambio, caixa de inversão para marcha a ré, óleo lubrificante, eixos entre outros componentes.

Foram muitas as inovações trazidas pela geração conjugada de energia. A real economia, em termos de consumo, veio da divisão da carga entre o motor a combustão e o elétrico. Como é feita essa divisão será mostrado mais adiante. O mais importante de se mencionar agora são as características dos sistemas híbridos em dois casos particulares:

Sistema da Lexus

O HSD equipa os carros híbridos da Lexus até hoje e vem sendo aprimorado a cada lançamento da marca. Sendo a líder em desenvolvimento de veículos híbridos, a empresa tem o nome entre as melhores fabricantes de automóveis da atualidade e disputa mercado em diversos segmentos automotivos, incluindo o híbrido.

O sistema é composto basicamente por um motor de combustão convencional, acoplado a uma transmissão eletrônica, um motor elétrico de alta tensão, um conversor de corrente DC-AC e uma central eletrônica, a qual gerencia a quantidade de carga que é distribuída a cada motor, a recarga da bateria e a gestão de energia dos sistemas elétricos do veículo.

Lexus™ RX400h de 2005 - "*It was the world first full hybrid crossover".*

Display central mostrando a distribuição de potência entre os motores.

Cofre do motor mostrando o HSD.

Lexus	RX 350 FWD	RX 450h AWD
Horsepower	270 hp @ 6,200 RPM	295 Total System Horsepower
EPA Fuel Economy Ratings (city/highway/combined)	18/25/21 mpg	30/28/29 mpg
Transmission	Six-speed automatic Electronically Controlled Transmission with intelligence (ECT-i), Sequential Shift and Snow mode	Electronically controlled Continuously Variable Transmission with intelligence (ECVT-i) with Sequential Shift Sport and Snow mode

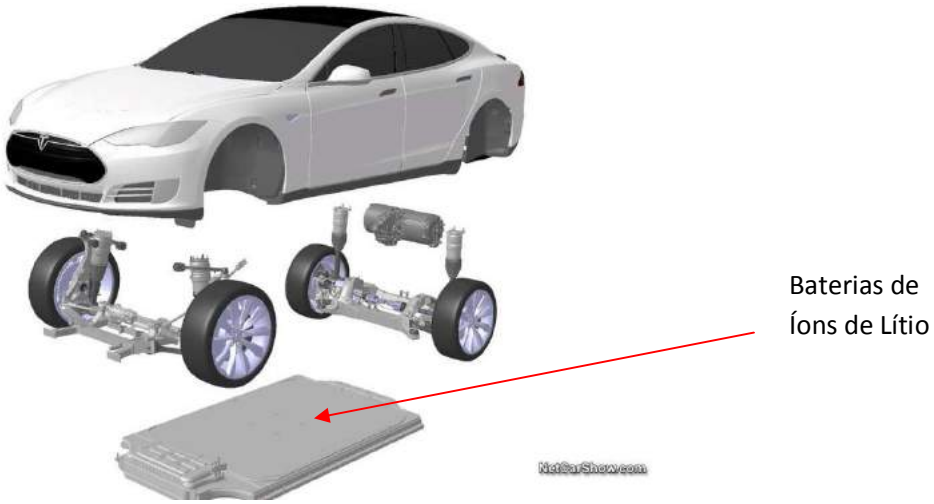
Dados técnicos comparativos entre o Lexus RX350 2013 e o Lexus RX450h 2013. Especial atenção a economia de combustível atingida no trecho urbano.

Sistema da Tesla

O Model S da Tesla é o primeiro sedan projetado desde suas bases que aproveitou a vantagem da arquitetura totalmente elétrica. O revolucionário conjunto propulsor localiza-se sobre o piso do carro, deixando-o com um centro de gravidade extremamente baixo. Conjuntamente com uma carroceria totalmente de alumínio, o veículo uniu estabilidade durante a condução, eficiência e os maiores padrões de segurança.

Devido à inexistência de um motor de combustão interna, de um eixo de transmissão e de uma transmissão em si (possui apenas uma marcha), seu interior possui maior espaço, característica também compartilhada por muitas embarcações híbridas. As baterias utilizadas possuem a maior densidade de energia que pode ser acumulada em toda a indústria de

baterias. Seus motores de 85KWh possuem a maior autonomia entre os veículos elétricos e, com autonomia de 265 milhas, tornou-se referência em economia de combustível, com a marca de 89 milhas por galão elétrico (essa unidade refere-se ao consumo de combustível da bateria, o qual será explicado mais adiante).

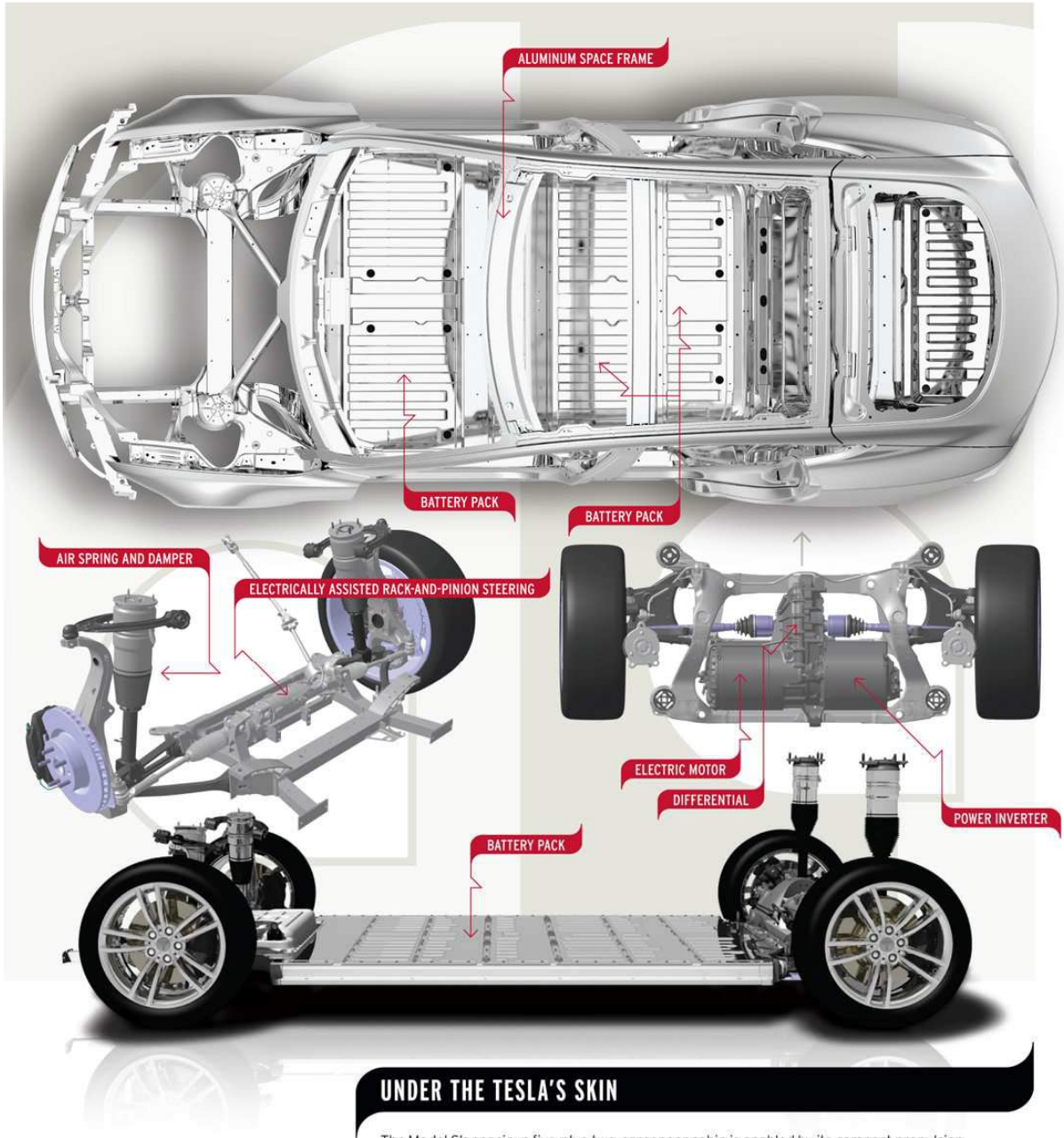


Esquema do modelo Tesla™ S Model. Seu conjunto de bateria de Íon de Lítio compõe o chassi do carro e mantém seu centro de gravidade baixo.

O motor de corrente alternada, os circuitos inversores e o diferencial estão contidos em um compacto conjunto suportado por uma estrutura traseira isolada por borracha. Mais de 7000 células elétricas cilíndricas são instaladas verticalmente dentro de uma grande caixa de alumínio que ao mesmo tempo serve de estrutura principal para o carro (seu chassi). Circuitos de líquido refrigerante mantêm o controle da temperatura no conjunto de baterias e nas linhas de transmissão e motor dentro dos limites desejados.

Uma bateria completamente descarregada pode ser totalmente carregada em apenas 10 horas com tensão de 240V.

A energia armazenada nas baterias quando transmitida para os motores podem gerar 416HP.



UNDER THE TESLA'S SKIN

The Model S's spacious five-plus-two-passenger cabin is enabled by its compact propulsion system and clever component layout. The AC drive motor, power-inverter circuits, and final-drive differential are contained within compact housings supported by a rubber-isolated rear subframe. More than 7000 cylindrical battery cells are vertically oriented inside a large aluminum box that also serves as the body structure's floor. Liquid cooling circuits keep the driveline and battery pack within desired temperature limits during strenuous driving. A rigidly attached front crossmember supports the suspension system's lower control arms and the power rack-and-pinion steering gear. An aluminum space frame—augmented by high-strength steel B-pillars and bumper beams—supports the above components as well as the formed-aluminum body panels.