

# CAPÍTULO 1

## A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO

### 1.1 Um breve histórico

Capturar a força dos ventos para propulsionar embarcações foi uma ideia que surgiu de forma independente em diversas partes do mundo. Os primeiros registros desta modalidade são datadas de aproximadamente 3000 A.C. referente a figuras de barcos com casco de papiro no Nilo. A mastreação ficava muito próxima da proa (em cerca de  $\frac{1}{4}$  do comprimento) e a função do leme era realizada por longos remos lançados na popa. O surgimento deste tipo de navegação se deu a fim de auxiliar a mão de obra escrava e bois na árdua tarefa de rebocarem os barcos, através de cordas, pelas margens do rio.



*Figura 1: Pintura de barco com casco de papiro.*

Posteriormente surgiram, em regiões no Índico, Mediterrâneo e Pacífico, barcos que também faziam uso do vento para se deslocarem, coincidentemente todos eram providos por velas quadradas. Era possível encontrar arranjos de velas e remos nos drakkares e knarres vikings, nos vasos de guerra fenícios, nas jangadas polinésias e em juncos de carga chineses (ver esquadra de Zheng The em 1431).



*Figura 2: Embarcação Viking.*

Entretanto esta composição servia apenas para navegar a favor do vento. Evoluções intermediárias foram feitas modificando a posição do mastro e realizando diversas combinações de velas quadradas e remos para propulsionar as embarcações contra a força dos ventos, mas a solução definitiva surgiu com as chamadas “velas latinas”, elas permitiam que se navegasse de través para o vento e não apenas a favor, porém, nunca de proa!

Com um corte em forma de triângulo, foi utilizada em barcos pesqueiros ao fim da idade média, pelos genoveses em seu comércio com Bizâncio, passando pelos Vikings, que aperfeiçoaram utilizando-as também em forma de vela quadrada e finalmente pelos navegadores ibéricos, que as empregaram em suas caravelas, naus e galeões.

Com a revolução industrial vieram os motores a vapor que forneceram mais velocidade e conforto tanto aos navios mercantes como os das marinhas de guerra de todo o mundo.



*Figura 3: Navio Turbinia – Primeira embarcação movida a vapor*

No final do século XIX, foi criado o motor de combustão interna, que foi substituindo, gradualmente, a antiga tecnologia ao ponto que hoje é empregado quase que na totalidade da frota mundial de navios. Esta mudança ocorreu devido às vantagens relacionadas com a economia de peso e espaço devido a não necessidade de possuir caldeiras, condensadores assim como tanques de água de alimentação, outro fator que contribuiu para esta mudança foi a melhor eficiência energética do diesel sob o vapor. Enquanto o primeiro consome 175 gramas por CV a máquina a vapor utiliza 375 gramas para desenvolver a mesma potência.

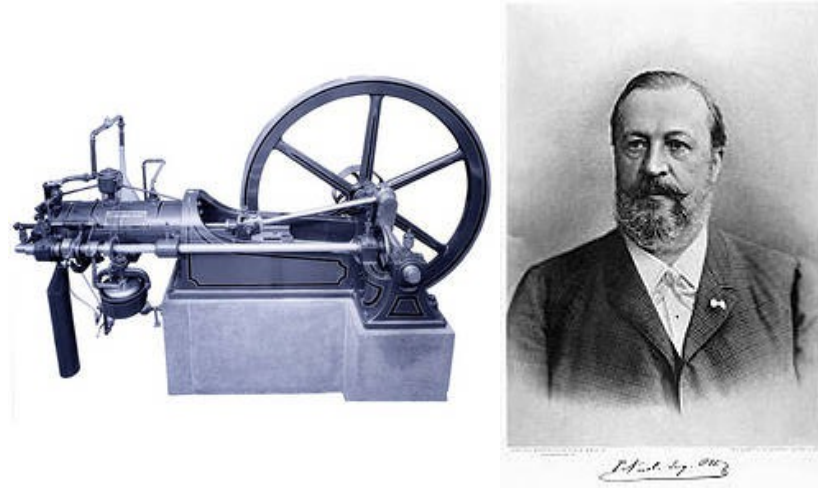
A constante busca por melhorias nos atuais sistemas de propulsão, no que se refere a custos, potência, eficiência, manobrabilidade, densidade de potência, controle de poluentes entre outros, é o que provoca a inevitável evolução, e aqueles que não evoluem, perecem.

Com base nesse histórico, os sistemas atuais envolvendo a transmissão mecânica de energia atingiram seu limite tecnológico e viabilidade econômica nos forçando a evoluir mais uma vez em busca de melhorias, e a tecnologia que promete atender a todas essas melhorias é justamente a propulsão elétrica, e o sistema baseado em geradores e motores diesel-elétricos, bem como outras combinações com melhores fontes de energia - como a tecnologia "*fuel cell*" apresentada de forma simplificada mais adiante -, o que confere ao projeto do navio uma redução da praça de máquinas, uma vez que diesel geradores são menores que os Motores de Combustão Principais (MCPs), também não há necessidade de linha de eixo uma vez que os motores elétricos são instalados diretamente sobre unidades *Azimutais*. Bastante utilizado em rebocadores e unidades offshore por permitir uma economia de combustível quando em posicionamento dinâmico, ao usar energia suficiente apenas para acionar os *thrusters* e equipamentos de bordo para a realização da operação, ausentando a necessidade de se manter o motor principal em funcionamento.

## 1.2 A máquina de combustão interna

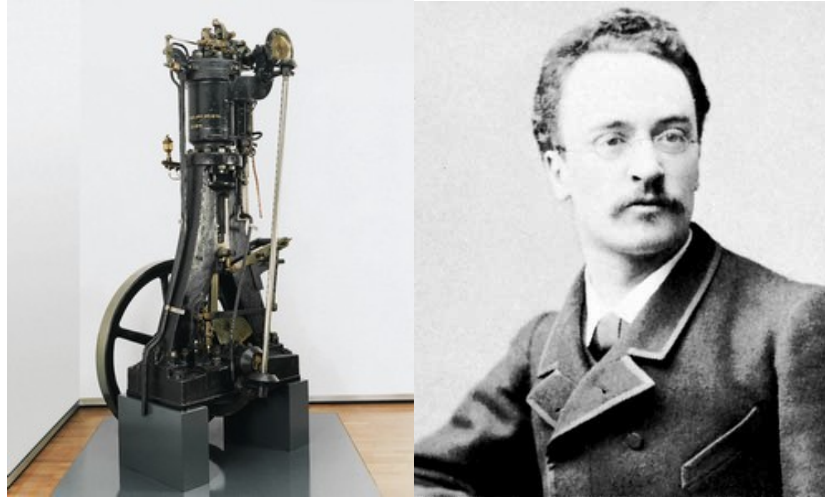
O objetivo das máquinas de combustão interna reside na produção de energia mecânica a partir da energia química contida no combustível. O motor de combustão interna que tornou possível meios de transporte como automóveis, aviões e navios foi evoluindo ao longo do tempo. Em 1860, *Ettiene Lenoir* (**inventor nascido na Bélgica em 1822**) registrou a primeira patente relativa a um "motor de explosão", a dois tempos. O ciclo a quatro tempos apenas seria descrito por *Alphonse Beau de Rochas* (**engenheiro francês nascido em 1815**) dois

anos depois, em 1862. No entanto, este trabalho não atraiu a atenção de nenhum fabricante. A produção industrial de motores de combustão interna com ciclos de quatro tempos iniciou-se em 1876 segundo a patente de *Nicolaus Otto* (**engenheiro alemão nascido em 1832**) e *Eugen Langen* (**engenheiro alemão nascido em 1833**).



*Figura 4: Protótipo do primeiro motor Ciclo Otto, Nicolaus Otto ao lado.*

*Rudolf Diesel* (**engenheiro nascido na França em 1858**) foi o primeiro pesquisador a basear-se no aquecimento produzido pela compressão do ar para inflamar o combustível, tendo começado as suas pesquisas em 1890 e obtido, sete anos depois, um motor operacional. Outro inovador cujo nome é bastante familiar à maioria da população é *Louis Renault* (**inventor francês nascido em 1877**), fundador do *Grupo Renault*, que criou, em 1902, o *supercompressor*, um sistema que aumenta a eficiência, na medida em que introduz uma quantidade adicional de oxigênio no motor. A finalidade deste sistema é semelhante à do *turbocompressor*, que usa os gases de descarga para fazer girar uma turbina e foi inventado em 1905 por *Alfred Bruchi* (**engenheiro suíço nascido em 1879**).



*Figura 5: Protótipo do primeiro motor Ciclo Diesel, Rudolf Diesel ao lado.*

Inicialmente, estes motores utilizavam gás como combustível. O responsável pelo primeiro motor de quatro tempos à gasolina utilizável, que foi concebido e projetado em 1885 foi *Gottlieb Daimler* (**engenheiro alemão nascido em 1844**), concretizado no mesmo ano que o anterior.

### **1.2.1 Consumo de combustível**

A maioria dos navios mercantes e militares da frota mundial usam motores diesel consumindo combustível de origem fóssil em suas instalações propulsoras e sistemas auxiliares. Os motores de grande porte para propulsão geralmente são de dois tempos, enquanto que os motores menores usados como máquinas auxiliares são normalmente de quatro tempos. Os combustíveis mais comumente consumidos nestas instalações são o óleo combustível pesado ou o óleo diesel marítimo. O gás natural de petróleo é também usado, mas em escala muito pequena.

Uma questão de grande relevância deve ser considerada no atual cenário do emprego de combustíveis fósseis. Ela está relacionada diretamente com os interesses dos armadores e se refere à participação das despesas com combustíveis no custo operacional de um navio. Esta influência depende, evidentemente, do preço dos combustíveis derivados do petróleo. O preço do petróleo cru chegou à marca histórica acima de *140 USD/barril* em Julho de 2008. Foi derrubado, na sequência, para *40 USD/barril*, devido ao pico da crise de crédito mundial, mas atualmente já converge para valores que tendem a ultrapassar três dígitos rapidamente, e estará sempre ameaçado por fatores políticos e pela lei da oferta e procura.

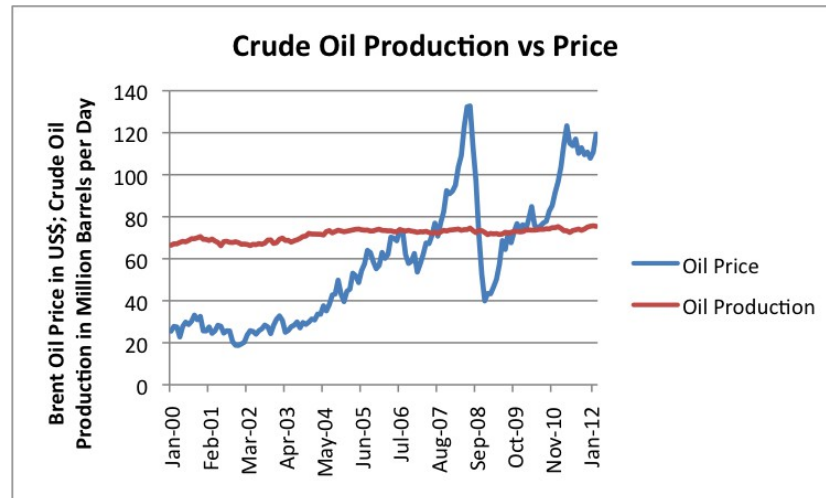


Figura 6: Produção de Petróleo Bruto e seu preço ao longo dos anos, com base em informações do EIA (Energy Information Administration).

Conforme disponível no *Bunker Index* (2011), os preços de combustíveis para navios (*bunkers*, no Inglês) para abastecimento em Santos é de 610 USD/t para óleo pesado de qualidade IFO380, e de 950 USD/t para óleo diesel de qualidade MGO.

Dentro deste cenário, o fator custo dos combustíveis para navios (*bunkers*) é significativo na composição dos custos globais. Para exemplificar, considere um motor diesel de 60 MW, aplicado na propulsão de um navio porta contêineres de grande porte. Adotando um consumo específico de 170 g/kWh, este motor chega a consumir 10,2 t/h de combustível. O custo diário, consumindo óleo pesado, atinge USD 149.328, valor que dá a importância desse fator no custo operacional do navio.

Independente do tipo de instalação, conforme *Woodyard* (2004) e para *Brinat* (2009), grandes esforços estão sendo feitos pelos fabricantes de máquinas para atender os requisitos de melhoria contínua da eficiência térmica, com redução do consumo de combustíveis, bem como o controle da emissão de poluentes que será discutido no próximo item. Tais esforços levam os fabricantes a terem maior foco no que diz respeito aos motores elétricos, como a propulsão diesel-elétrica por exemplo.

## 1.2.2 Emissão de poluentes

A emissão de poluentes por parte das máquinas de combustão interna é, pelo seu impacto ambiental, um tema de grande importância. Os motores (entende-se MCI) são uma fonte

potencial de poluição atmosférica pelo que grandes esforços têm sido desenvolvidos no sentido de promover a redução das emissões, como a substituição daqueles (MCIs) por motores elétricos. De um modo geral, são conhecidos três modos pelos quais as máquinas de combustão interna liberam para a atmosfera substâncias consideradas poluentes:

- pela evaporação do combustível armazenado;
- pela emissão de gases no tanque de serviço de óleo;
- pelos gases de descarga.

Para a proteção da saúde pública e do meio ambiente, foram definidos padrões mínimos de qualidade do ar atmosférico e foram implementadas legislações no sentido de controlar essas emissões.

No caso particular dos motores marítimos, em que naturalmente os gases de descarga são a principal fonte de emissão de poluentes, as emissões para a atmosfera dos gases de descarga têm sido limitadas. Instrumentos legais nessa área foram criados a três níveis:

- internacional (IMO - *MARPOL*);
- nacional (órgão de fiscalização e controle do país - no caso do Brasil é o *Ministério do Meio Ambiente*, MMA);
- regional.

Os valores limite variam com a instituição regulamentadora, prevendo em alguns casos penalidades pecuniárias. Por exemplo, quanto às emissões de  $\text{NO}_x$  em função da velocidade de rotação, as restrições impostas pela IMO (*Anexo VI da MARPOL 73/78*) são as constantes na figura abaixo:

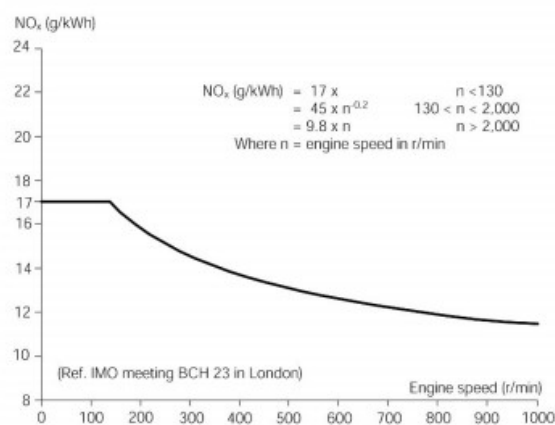


Figura 7: Limitações às emissões de  $\text{NO}_x$  impostas pela IMO.

A formação de dióxido de carbono é inevitável na queima de hidrocarbonetos. A única forma de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> passa por um melhor aproveitamento da energia liberada na combustão e conseqüente redução do consumo específico dos motores. Os outros poluentes presentes nos gases de descarga são:

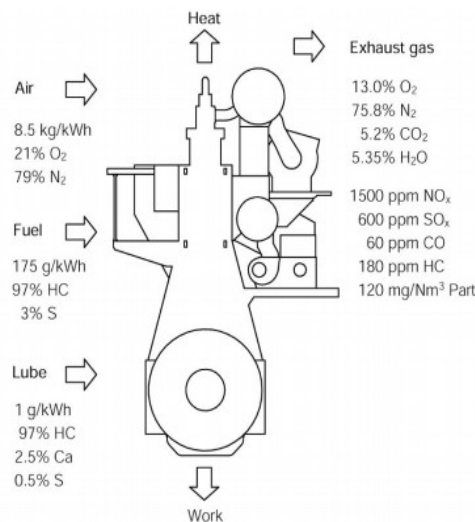
- óxido de azoto, monóxido e dióxido de azoto, em conjunto em conjunto designado por NO<sub>x</sub>;

- monóxido de carbono, CO;

- compostos orgânicos, hidrocarbonetos parcialmente ou não queimados, HC;

- partículas diversas.

A composição típica dos gases de descarga de motores diesel marítimo é a apresentada na figura a seguir, analisemos sucintamente cada um dos casos e alguns dos principais efeitos nocivos de cada poluente.



*Figura 8: Valores típicos dos poluentes emitidos para a atmosfera por um motor diesel marítimo.*

No caso das emissões de NO<sub>x</sub>, a concentração desse poluente nos gases de descarga dos motores diesel marítimo atinge valores em torno de 500 a 1000 ppm. A exposição durante 15 minutos a concentrações superiores a 5 ppm provoca tosse e irritação das vias respiratórias. A exposição contínua pode conduzir à acumulação de líquido nos pulmões, edema pulmonar.

Os motores diesel emitem quantidades desprezíveis de monóxido de carbono. No entanto, vale lembrar que esse gás inodoro e transparente é letal para a espécie humana em poucos minutos de exposição a concentrações na ordem de 5000 ppm. Exposições mais prolongadas



ainda que à concentrações inferiores podem também reduzir significativamente a percepção visual, a destreza física e o raciocínio.

A emissão de dióxido de enxofre é condicionada pelo teor de enxofre no combustível. Como óxidos de enxofre são normalmente considerados o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{SO}_3$  bem como seus ácidos e sais, esses compostos são de forma geral nocivos ao aparelho respiratório humano.

Com respeito aos hidrocarbonetos não queimados, bem como compostos industriais de origem semelhante, têm sido identificados como cancerígenos.

Finalmente, a emissão de partículas é um problema quase exclusivo dos motores diesel. O chumbo, exemplo no que diz respeito a partículas, ao contrário dos outros poluentes até agora citados, tem uma ação de intoxicação do organismo de modo acumulativo. Cerca de 20 a 50% da quantidade inspirada é absorvida e retida pelo organismo. O efeito acumulado de exposição a partículas de chumbo pode levar a graves distúrbios de ordem física, muscular e cerebral.

Além dos efeitos nocivos diretos sobre a espécie humana, anteriormente enunciados, é extensa também a relação dos feitos ambientais secundários dos poluentes emitidos pelas máquinas de combustão interna. O emprego de óleos pesados causa poluição do ar devido à emissão de óxidos nitrosos, óxidos sulfurosos, material particulado e gás carbônico, citados nos parágrafos anteriores, este considerado por uma corrente de pensamento como danoso a camada de ozônio.

Os impactos ambientais causados pelo transporte marítimo estão sendo objeto de diversas pesquisas. De forma semelhante ao que ocorre com outros modais de transporte, estão sendo impostas restrições sobre a emissão de gases poluentes de motores empregados em navios.

Essas restrições têm um efeito direto sobre o custo operacional dos navios. De um lado, os motores, para reduzir a emissão de poluentes, terão uma redução na eficiência térmica (aumento de consumo específico); de outro lado, para a redução de outros poluentes é necessária à aquisição de combustíveis mais destilados ou purificados, por exemplo: com menor teor de enxofre e, portanto, muito mais caro.

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	3.5%
2012		
2015	0.1%	0.5%
2020 <sup>a</sup>		
a - alternative date is 2025, to be decided by a review in 2018		

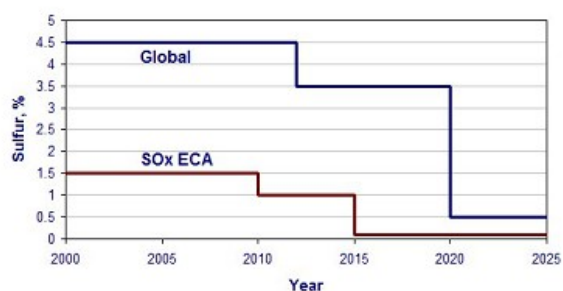


Figura 9: Calendário previsto para a redução de enxofre no combustível.

Tier	Date	NOx Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016 <sup>†</sup>	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96
† In NOx Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).				

Figura 10: Valores limites previstos para as emissões de NO<sub>x</sub> pelos motores.

Considerando o crescimento da frota mundial de navios mercantes e de guerra, pode-se avaliar a degradação do meio ambiente que representa o emprego de combustíveis derivados de petróleo no transporte marítimo.

### 1.2.3 Conclusão

A dependência que o transporte marítimo tem dos combustíveis fósseis coloca em evidência duas questões relevantes: custo operacional, devido ao alto preço dos combustíveis e impacto ambiental. Há ainda um ponto adicional, que se refere à redução das reservas de petróleo e a sua possível extinção, em um futuro mais distante.

Tudo isso exige que se realizem estudos com a finalidade de redução de emprego de combustíveis derivados de petróleo no transporte marítimo, que pode ser atingido de duas formas: redução da demanda de energia a bordo, e emprego de fontes de energia alternativa. Uma grande solução para as questões apresentadas é o acionamento da propulsão marítima por motores elétricos e suas combinações.

### 1.3 A Propulsão Elétrica

A propulsão elétrica não é uma invenção nova. Quando os primeiros motores diesel passaram a ser confiáveis o suficiente para serem usados como meio de propulsão, em 1903, eles ainda eram não reversíveis. Nessa época, a propulsão elétrica era a única solução para esse problema técnico básico. A propulsão elétrica (ou diesel elétrica) evoluiu nas décadas seguintes e hoje a eletrônica de potência moderna permite que o conceito de "usina elétrica" adotado a bordo dos navios seja amplamente utilizado de forma ainda mais eficiente.

O fato de não ser reversível era um grande problema para as embarcações movidas por motores a combustão interna no início do século. O primeiro projeto veio de uma fonte inesperada: foi o engenheiro elétrico italiano *Cesido Del Proposto* quem inventou e desenvolveu a então nova forma de propulsão, simultaneamente com os trabalhos similares desenvolvidos no *Ludwing Nobel*, em *São Petersbugo, Rússia*. Além do eixo e do propulsor, seu sistema consistia de um gerador de



Figura 11: Carta Patente atribuída a *Del Proposto*.

corrente contínua, acionado por um motor diesel e um motor, também de corrente contínua. Esse arranjo, simples e ao mesmo tempo genial, permitiu que o motor fosse revertido com facilidade, bastando pará-lo e inverter a conexão elétrica (troca de fases), fazendo com que ele partisse no sentido contrário.

A princípio, com essa invenção foi superado o maior obstáculo ao uso de motores diesel não reversíveis e a atratividade dessa aplicação veio crescendo consideravelmente ano após ano com a melhoria da taxa potência-por-quilo.

A primeira embarcação movida a propulsão elétrica foi o navio-tanque russo *Vandal*, de 75m e 800tdw, operado pela companhia de extração de petróleo *Nobel Petroleum Company*, aseada em *São Petersburgo* e com operações no rio *Volga* e no mar *Cáspio*.

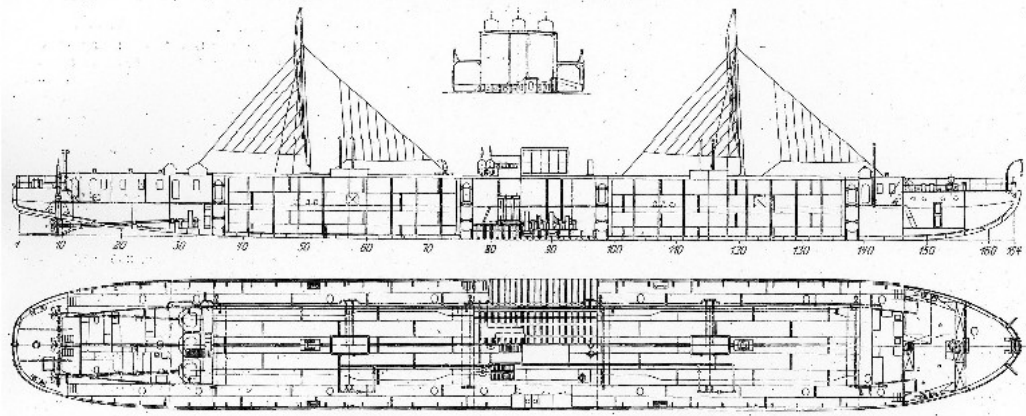


Figura 12: Plano de perfil e superior do Vandal (tanker).

O navio possuía três propulsores acionados por três unidades de propulsão elétrica montadas à meia-nau. Cada uma das unidades consistia de um motor diesel de três cilindros e um gerador de corrente contínua de 87 kW 500V. Esses geradores eram conectados eletricamente aos motores elétricos, cada um consumindo 75 kW para girar seus eixos propulsores. Cada unidade propulsora podia ser controlada separadamente a partir do passadiço, o que garantia ao navio mobilidade até então não observada. Os equipamentos elétricos e os controles foram projetados e construídos pela empresa sueca *ASEA*, adaptando os controles utilizados nos carros elétricos da época até onde se sabe.

Com exceção de algumas falhas que forçaram o adiamento da viagem inicial, o navio atendeu de excelente às expectativas. A manobra de reversão de "*full ahead*" para "*full reverse*" levava menos de 10 segundos.

Como primeiro protótipo, o sistema não era tão eficiente quanto se esperava. Os motores diesel produziam uma potência total de 360 HP e desses, apenas 290 HP eram aproveitados pelos propulsores, uma perda de potência de aproximadamente 20%. Apesar dos equipamentos serem os mais leves de sua época, o sistema ainda era muito pesado: os motores diesel pesavam 48 toneladas e os componentes elétricos 31,2 toneladas.

No livro "*Der Antrieb Von Schiffen durch nichtreversierbare Maschinen*", publicado em 1906, *Del Proposto* escreveu:

'... É relativamente óbvio que a transmissão elétrica contínua possui grandes vantagens, mas também consideráveis desvantagens. Levando em consideração os pros e os contras, parece que o problema dos sistemas de propulsão não-reversíveis não está totalmente resolvido, pelo menos não resolvido de forma satisfatória...'

O navio operou até 1913, quando foi então desativado.

Com a necessidade bélica do século XX se desenvolveram navios submersíveis ou submarinos, os sistemas tinham que consumir o mínimo possível de oxigênio. A solução novamente foram motores elétricos, nesse caso alimentados por um grande grupo de baterias.

A dificuldade de armazenagem é até hoje um dos grandes inconvenientes da tecnologia. As baterias eram um problema, pois tinham que ser recarregadas de alguma forma e durante o processo de carga/descarga produziam gases tóxicos.



*Figura 13: Praça de baterias de um submarino.*

Quando um submarino submerge, seus motores de combustão interna não podem ser operados devido à inexistência de ar suficiente para a queima do combustível. Nesse caso era necessária a utilização de um “*snorquel*” e de navegar a poucos metros da superfície, ocasião na qual as baterias podiam ser recarregadas até ser possível submergir.

Na metade do século XX, a propulsão elétrica ganhou força em uma área totalmente diferente: ferrovias, utilizando MEP de corrente contínua. Durante a escassez de recursos para pronta entrega, os EUA encontrou uma saída: a produção de navios de guerra com sistemas de propulsão elétrica baseado na tecnologia das locomotivas elétricas.

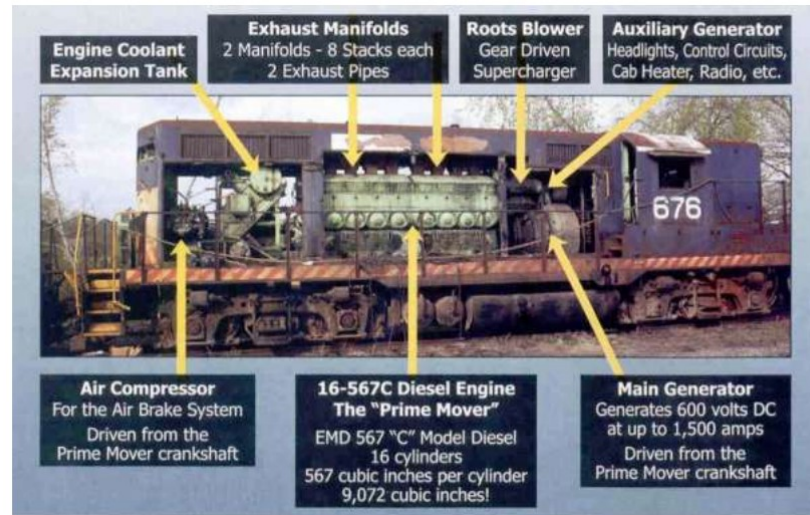


Figura 14: Casa de Máquinas de uma locomotiva elétrica.

Hoje, submarinos franceses novamente ganham destaque na mídia por inovar mais uma vez. Ao invés de utilizar tecnologia nuclear para alimentar o MEP de seus submarinos, a Marinha Francesa desenvolveu células de combustível que consomem hidrogênio (*fuel cell*), que além de serem mais limpas e seguras, são um belo exemplo de como a propulsão elétrica é versátil e pode tirar proveito de novas formas de geração de energia.

### 1.3.1 Propulsão elétrica por corrente contínua

As primeiras embarcações com propulsão elétrica em CC datam do início do século XX, rebocadores de alto mar que, na sua maioria, eram destinados ao socorro e salvamento e formaram a base tecnológica para o que hoje são nossas Embarcações de Apoio Marítimo (EAM).

A propulsão convencional possui uma série de desvantagens para as EAM. Em baixas rotações, MCPs tendem a ter um consumo de combustível muito maior, além de o motor carbonizar mais rapidamente já que todo esse combustível não é queimado por completo. Em rotações muito baixas, equivalente a menos de 5 nós, o MCP simplesmente "morre". A solução consiste em partir o MCP e pará-lo logo em seguida, manobra limitada pela capacidade de armazenamento das ampolas de ar para partidas sucessivas, o que pode variar de dez a quinze vezes. Após o consumo da carga das ampolas, muitas embarcações precisavam ficar '*boiando*', enquanto seus compressores as recarregavam.

O sistema de propulsão elétrica em CC também possui vários problemas, descritos a seguir, mas mesmo assim era adotado como uma solução para as operações das EAM que visavam além de tudo, alta manobrabilidade. Algumas empresas ainda operam navios com essa tecnologia.

### 1.3.1.1 Os motores

Os motores elétricos de corrente contínua são geralmente do tipo série universal dotado de coletores de teclas e várias escovas, o mesmo utilizado em submarinos da Segunda Guerra Mundial. O uso de motores com escova está em declínio devido à grande manutenção necessária para um bom funcionamento.



*Figura 15: Motor Elétrico (CC) com visão dos coletores de teclas e suas escovas.*

### 1.3.1.2 Manobrabilidade e tempo de resposta

O sistema era na época considerado de alta manobrabilidade. Era possível realizar ajustes finos na rotação dos hélices propulsores conforme a necessidade da situação, RPM por RPM, a partir do zero.

A regulação era realizada em controles, que consistiam basicamente em chaves manuais e reostatos. A aceleração era obtida aumentando a corrente de excitação no campo dos MEPS pela redução da resistência em seus reostatos de campo.

O tempo de resposta de um motor com escovas varia muito de acordo com o tamanho do motor. Um motor de 4.000 kW leva aproximadamente sete segundos para parar, o que para os padrões da época não era ruim, mas atualmente é considerado lento.

### 1.3.1.3 Desgaste e manutenção básica

O atrito entre as escovas e o coletor é inevitável e provoca desgaste da escova e a formação de centelhas, pequenas no início (*small spark*), mas que intensificam o processo. Conforme as centelhas aumentam (*large spark*), o calor também aumenta e esse excesso de calor pode destruir totalmente o material isolante entre as teclas e o eixo o que em último estágio causará curtos circuitos.

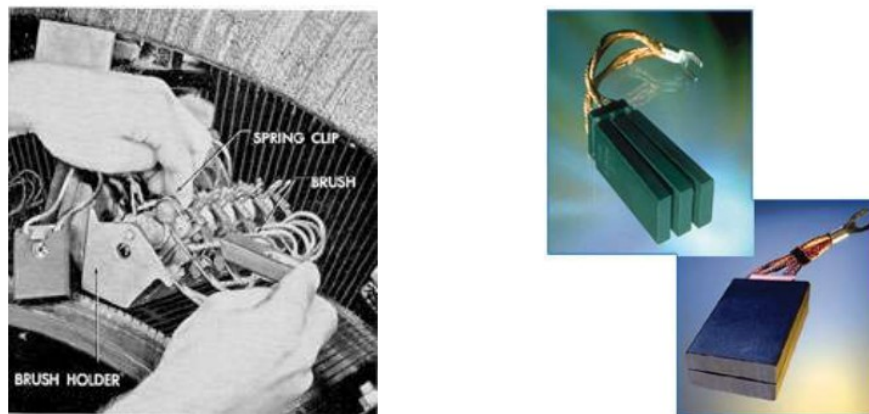


Figura 16: Coletor e escovas de um antigo motor elétrico em CC.

Como o uso contínuo e as grandes variações de corrente durante as manobras provocam desgaste acelerado tanto das escovas quanto dos coletores, os motores normalmente vem equipados com janelas de inspeção onde o centelhamento e o tamanho das escovas pode ser observado. Quando o centelhamento é intenso, deve-se parar imediatamente o MEP para manutenção.

A limpeza do coletor deve ser realizada com materiais não abrasivos e não condutores e de forma cuidadosa para não avariar o material isolante que separa as teclas. As teclas que sofreram um desgaste excessivo devem ser recobertas com liga de níquel e, após análise, as escovas que tiverem sofrido um maior desgaste também devem ser substituídas.





*Figura 17: Motor elétrico com avaria no coletor (esquerda) e deposição de liga de níquel nas teclas de um coletor (direita).*

É necessário que o calor gerado pela comutação dos campos da máquina sejam dissipados, o que normalmente era feito em motores antigos por ventoinhas acopladas aos seus eixos, por essa razão não podiam ser enclausuradas como os modernos motores atuais.

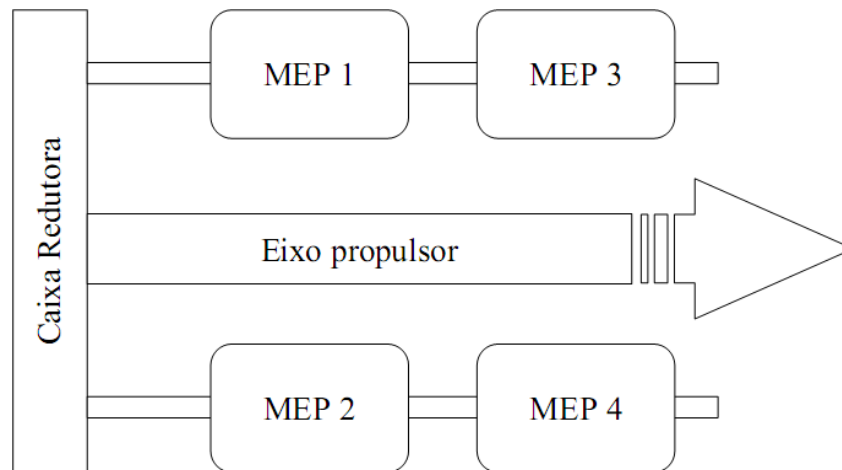
Sendo abertos, tais MEPs recebem grandes quantidades do pó produzido pelas escovas, umidade e poeira da praça de máquinas além de corpos estranhos. Esse imenso número de partículas de carbono aumenta a vulnerabilidade e diminui a resistência de isolamento nos campos.

### **1.3.1.4 Arranjo do sistema**

Normalmente o sistema é um arranjo simples, composto por:

- . Diesel-geradores de altíssima potência;
- . Transformadores;
- . Retificadores de tensão ("SCR" ou *Retificador Controlador de Silício*);
- . Motores.

Os motores eram utilizados em grupos, com dois ou mais motores montados em um mesmo eixo. Os eixos comuns de cada grupo são então acoplados à caixa redutora, que transfere o movimento ao eixo propulsor como mostra a figura a seguir:



*Figura 18: Esquema de propulsão em corrente contínua com quatro MEPs.*

### 1.3.1.5 Conclusão

#### - Vantagens

Alta manobrabilidade para a época devido a possibilidade de ajustar precisamente a variação da rotação do eixo propulsor, resultando em fainas de socorro mais seguras para as antigas embarcações de socorro e salvamento.

#### - Desvantagens

A manutenção das máquinas elétricas era frequente, muito cara e complexa, devido aos problemas de comutação elétrica entre as escovas e o coletor e ao fato dos motores não serem enclausurados para fins de melhorar a ventilação.

### 1.3.2 Propulsão elétrica por corrente alternada

Motores de propulsão elétrica por corrente alternada (AC) começaram a surgir na indústria naval no final da década de 50, mas só foram se popularizar na década de 80. A crescente demanda por potência fez com que os sistemas baseados em corrente contínua tivessem seus dias contados, pois o peso e o tamanho dos MEP e dos GEP aumentavam significativamente conforme sua potência subia fazendo com que a corrente nas escovas de comutação atingisse níveis inaceitáveis.

Após a crise do petróleo da década de 70 e do fechamento do Canal de Suez, gigantes navios tanque começaram a ser usados para transportar petróleo do Oriente Médio para portos europeus. Devido ao seu tamanho, os navios tanque requeriam embarcações de apoio capazes de manobrar em águas cada vez mais restritas. A solução encontrada na época foi o *Sistema Schottel*, que resolvia o problema não com propulsão elétrica, mas com hélices montadas em um conjunto que podia ser movimentado em azimute, fornecendo a manobrabilidade requerida e dispensando o leme de uma forma semelhante ao que hoje temos modernamente como propulsão *Azipod*.

### **1.3.2.1 Comparação com os sistemas previamente utilizados**

A propulsão por corrente alternada não requer manutenção constante como o sistema por corrente contínua requer, daí sua evidência no mercado atual. Comparado com propulsão por combustão interna, o sistema por CA também é mais atrativo. MCPs precisam de grande espaço interno (principalmente quanto à altura), além da enorme quantidade de ruídos e vibrações que diminuem a vida útil e o desempenho de equipamentos, além de gerar desconforto, principalmente em navios de passageiro.

Outro fator evoluiu foi o tempo de resposta, que antes era lento e incluía limitações para a reversão e controle de velocidade uma vez que tais manobras eram realizadas inserindo e removendo bancos de resistores nas ligações entre os enrolamentos.

### **1.3.2.2 Propulsão elétrica com retificador e inversor**

O sistema de propulsão elétrica com retificador e inversor consiste de componentes eletrônicos que tornam possível a modulação precisa da onda que é enviada ao motor.

Nesse sistema a energia em corrente alternada produzida pelos grupos geradores (diesel-geradores, turbo-geradores, ou qualquer outro) é primeiramente retificada pelos grupos retificadores, o que transforma em corrente contínua. Essa corrente contínua é modulada por um inversor para atingir a amplitude e a frequência desejada, que pode ser aumentada ou reduzida fazendo com que o campo induzido acelere ou atrase.

A maioria dos inversores utilizam "*Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT's)*" para ligação dos enrolamentos, que são transistores bipolares com facilidade de acionamento e com

pequenas perdas, permitindo operação em alta frequência para correntes na faixa de algumas dezenas de ampères.

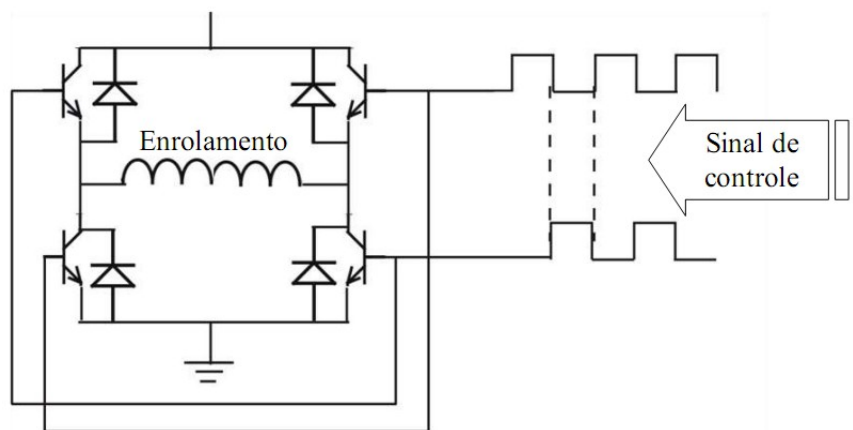
O processo de modulação é realizado de acordo com a resposta do rotor, o que é acompanhado por um sensor de posição que mostra exatamente em que ponto o rotor está em relação ao estator.

O sensor de posição é hoje o inconveniente do sistema. A mão de obra é especializada e o equipamento é de difícil acesso, o que gera um custo de manutenção muito alto. Atualmente a maior barreira a ser vencida na propulsão por corrente alternada é a construção de motores sem sensor de posição, ou com um sensor cuja manutenção seja viável.

### 1.3.2.3 Arranjo do sistema e ligação básica dos tiristores

A ligação entre os tiristores e o enrolamento do motor é relativamente simples. Um grupo de quatro tiristores recebe energia de entrada em corrente contínua, proveniente dos retificadores. Tal energia de entrada é controlada através de um sinal que é gerado por um controlador.

O controlador emite continuamente, com base na resposta do rotor e na manobra desejada, sinais que injetados na base (*gate*) dos tiristores, que vão controlar a forma da onda que passará pelo enrolamento do motor. O rotor responderá à variação e o processo se repetirá.



*Figura 19: Esquema básico do ligação de um dos enrolamentos de um motor propulsor em corrente alternada com inversor.*

### 1.3.2.4 Conclusão

Foram demonstradas neste capítulo as razões que levaram ao rápido desenvolvimento da propulsão elétrica. Atualmente é comum encontrar motores de partida direta e com partida estrela-triângulo praticamente em qualquer direção que se olhe, mas na área naval o sistema que foi a propulsão com retificadores e inversores devido a suas inúmeras vantagens, que inclui:

- . Alta manobrabilidade;
- . Longa vida útil por não possuir partes eletromecânicas móveis;
- . Não existem limitações quanto ao número de manobras.

Essas e outras vantagens serão especificadas no próximo capítulo.

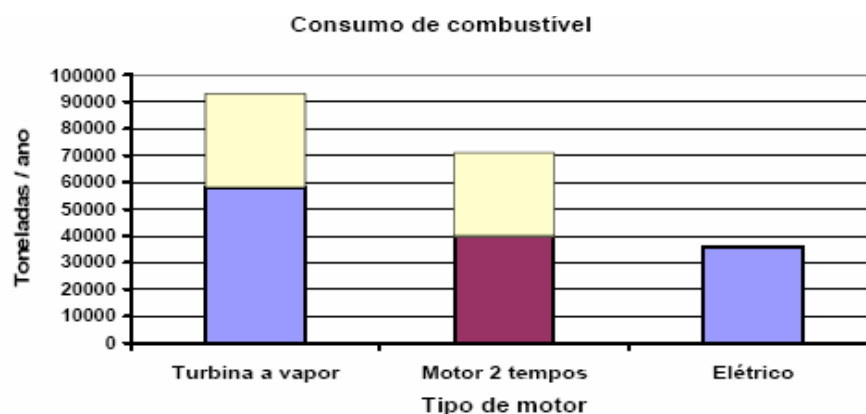
## CAPÍTULO 2

### VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

#### 2.1 Redução do consumo de combustível

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

Com o uso da propulsão elétrica, este problema é eliminado, e o motor primário pode operar no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice. Em virtude da extinção da conexão mecânica entre motor primário (que gera potência através da queima de combustível) e o eixo propulsor, não existe mais relação direta entre a velocidade do eixo do motor primário e a rotação do hélice. Segundo o documento da referência, a Marinha Americana estimou a eficiência energética em aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica.



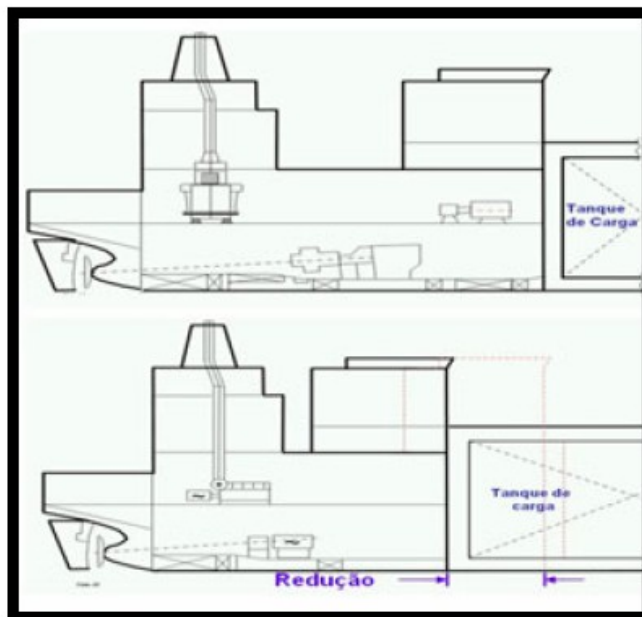
*Figura 20: Gráfico comparativo de consumo de combustível.*

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

## 2.2 Flexibilidade do projeto

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros (podem inclusive ser instalados em compartimentos diferentes). Dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas nas partes mais altas do casco, deixando apenas o motor elétrico junto ao fundo do casco conectado ao propulsor.

Observa-se na figura abaixo um ganho no espaço destinado ao transporte de cargas reposicionando a máquina diesel no convés superior, e desta forma, reduz-se o volume ocupado pelos dutos de admissão e exaustão dos motores. Como resultado desta flexibilização, torna-se desnecessário concentrar equipamentos em praças de máquinas principais; sendo possível espalhar os compartimentos de máquinas pelo navio, em áreas menos críticas, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo.



*Figura 21: Distribuição dos equipamentos na Praça de Máquinas.*

No navio com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pelo navio será gerada pelos motores principais. Esta diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço. A modularidade do sistema permite também que em altas velocidades sejam utilizados todos os dispositivos de

acionamento principal, e nas velocidades econômicas sejam desligados os que não forem necessários.

## **2.3 Aumento da vida útil da embarcação**

Os navios modernos incorporam cada vez mais sensores de alta complexidade tecnológica, que os tornam muito mais potentes do que os navios de gerações anteriores. Já os investimentos necessários para a aquisição destes meios têm crescido numa progressão ainda maior, tornando difícil justificar este gasto considerando o tempo de vida útil dos navios tradicionais. Com o evento da automação dos sistemas, nas décadas de 80 e 90, mais equipamentos elétricos e eletrônicos estão sendo incorporados aos navios, aumentando a demanda por energia elétrica. Isto vem fazendo com que os geradores instalados a bordo sejam de potência mais elevada, a fim de suprir a demanda já instalada e manter uma reserva para crescimento futuro.

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

Com isto, em velocidade normal, o navio possui capacidade de geração em excesso, capaz de atender todos os usuários com folga, assimilando sem dificuldades as substituições ou inclusões futuras de novos equipamentos ou sistemas. Os navios projetados com propulsão elétrica podem ter vida útil maior, da ordem de 50 anos, contra 25 ou 40 anos dos navios com propulsões tradicionais.

## **2.4 Redução do custo de manutenção**

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

Uma vez que com a adoção da Propulsão Elétrica não são necessários motores auxiliares, esta redução na quantidade de equipamentos instalados resulta numa diminuição dos custos de



manutenção. Associado a este fato, sabe-se que os equipamentos elétricos apresentam custos e períodos menores de manutenção e devido à elevada automação dos sistemas elétricos, as manutenções preditiva e preventiva são ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção.

## **2.5 Redução da emissão de poluentes**

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

Em decorrência das pressões internacionais busca-se utilizar cada vez menos combustíveis fósseis. As emissões de gases poluentes oriundas da queima de óleo diesel e gasolina são os maiores responsáveis pelo efeito estufa. Neste contexto, a propulsão elétrica está sendo fortemente indicada, principalmente para navios que operam em países que assinaram o *Protocolo de Kyoto*.

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

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

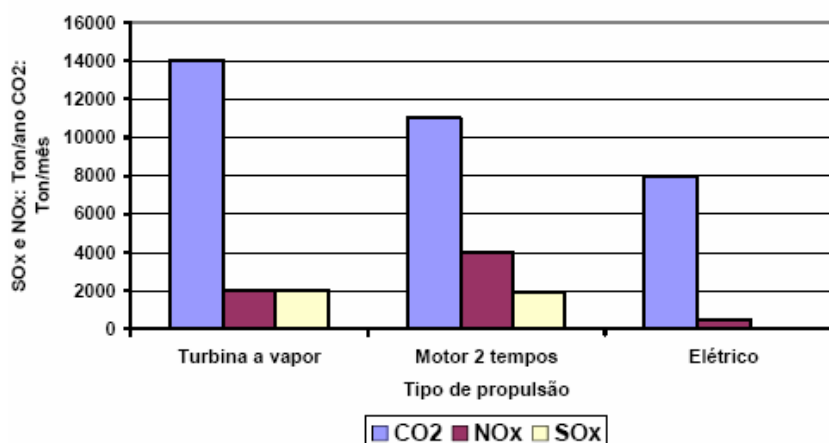


Figura 22: Gráfico comparativo das emissões de gases para a atmosfera.

De acordo com a linha de pesquisa na figura acima, a qual apresenta claramente que a Propulsão Elétrica gera menos gases poluentes que os sistemas convencionais (que operam somente com turbinas a vapor ou motores diesel), pois o conjunto diesel-gerador/motor elétrico que 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: CO<sub>2</sub> - Dióxido Carbônico, NO<sub>x</sub> – Óxido de Nitrogênio e SO<sub>x</sub> – Óxido de Enxofre) durante as operações. É interessante destacar que o modelo utilizado na pesquisa considerou também a geração de gases durante a operação portuária e tempos com o navio parado durante as viagens.

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

## 2.6 Redução da assinatura acústica

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

Além disto, os motores elétricos apresentam menor nível de ruído irradiado, devido às suas características construtivas e, portanto, não produzem tanta vibração e ruído quanto os equipamentos mecânicos.

E à medida que os sistemas e equipamentos que atualmente são mecânicos forem substituídos pelos elétricos, ocorrerá à diminuição da assinatura acústica total emitida.