

# BORDO LIVRE



REVISTA DO CLUBE DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

178

NOVEMBRO/DEZEMBRO 2023





**JORGE M. G. ANTUNES**

# O DILEMA DA DESCARBONIZAÇÃO QUANDO OS REGULAMENTOS ESTÃO À FRENTE DA TECNOLOGIA

## 1 INTRODUÇÃO

O objectivo para a descarbonização do shipping, declarado pela OMI (IMO International Maritime Organization) é reduzir as emissões de carbono (CO<sub>2</sub>) de todos os navios em 40% até 2030 e 70% até 2050 (em referência aos níveis de emissão de 2008).

As penalidades previstas para o não cumprimento dos limites impostos aos dois instrumentos de controlo também avançados pela IMO, o EEXI (Energy Efficiency of Existing Vessels) e CII (Carbon Intensity Index) tornam-se críticas, pois tais objectivos são praticamente impossíveis de alcançar, nomeadamente pela frota existente e pela falta de soluções tecnológicas que se possam aplicar àqueles navios. Gera-se assim um dilema, pois ao não existirem soluções técnicas que suportem tais objectivos, considerando a idade e composição da frota existente a operação de muitos dos navios existentes estará comprometida já a partir do próximo ano.

No presente trabalho, apresentam-se considerações de ordem técnica, económica e social, que tais limites impõem.

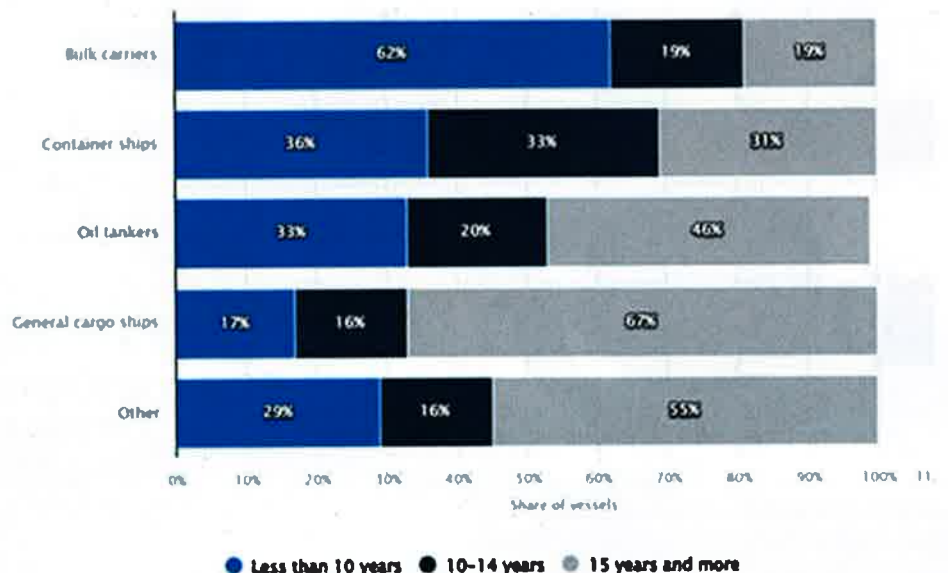
## 2 CONSIDERAÇÕES DE ORDEM SOCIAL

### 2.1 A COMPOSIÇÃO DA FROTA MUNDIAL O COMÉRCIO GLOBAL E OS GRANDES EMISSORES.

Conforme ilustrado na figura 1, 64% dos navios porta-contentores, os que maiores consumos de combustível apresentam, dadas as suas velocidades normais de operação têm mais de 10 anos. 66% dos navios-tanques têm mais de 10 anos, 82% dos navios de carga geral nos quais se incluem muitos "feeders" têm mais de 10 anos.

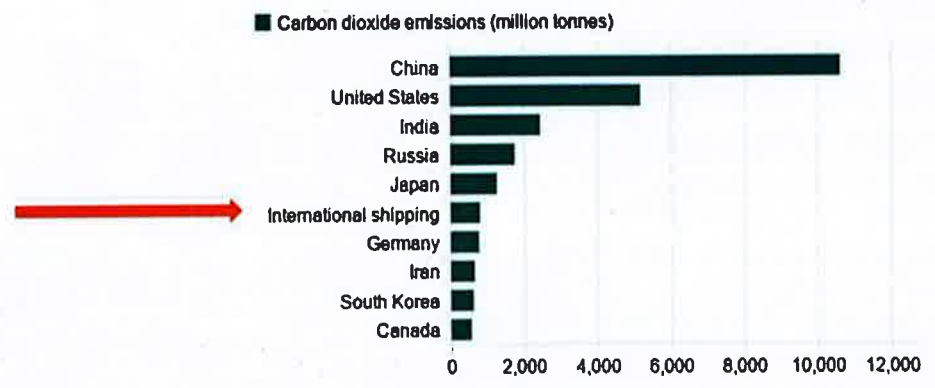
Pode-se concluir em primeiro lugar que, a frota existente é muito nova para ser descartada e velha para ser modernizada, dado muitas das soluções tecnológicas terem um forte impacto sobre a concepção dos navios.

Com base na figura 2, pode-se concluir que as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do "shipping", colocam-no em 6º lugar, emitindo mais CO<sub>2</sub>, que a Alemanha com as suas centrais a carvão.

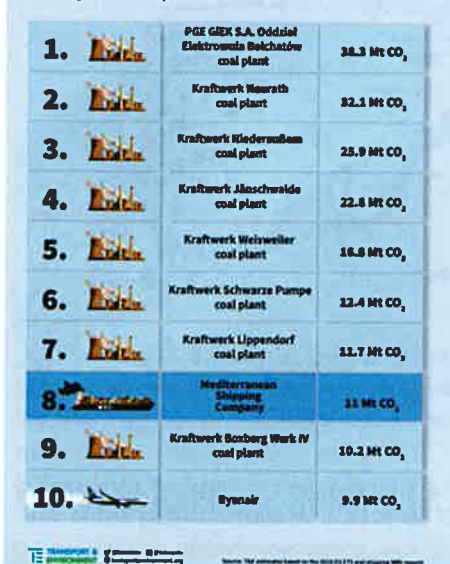


CIMA: Figura 1 Idade da frota mundial por tipo de navio. (fonte STATISTA)

BAIXO: Figura 2 As emissões CO<sub>2</sub> do "Shipping" comparadas com as das principais nações.



**Ships carrying iPads and avocados join coal plants and Ryanair in top 10 EU GHG emitters**



CIMA: Figura 3 Principais emissores Europeus de CO<sub>2</sub>, entre os quais se encontra a MSC em 8º lugar e a Ryanair em 10º.

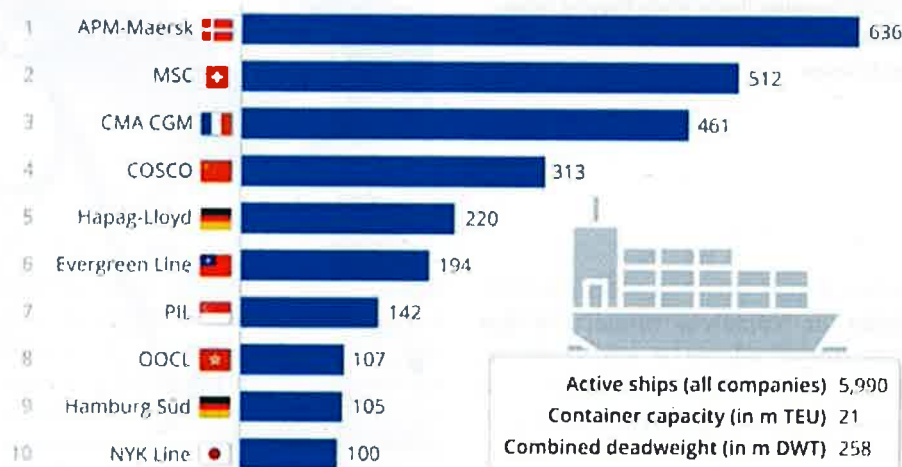
DIREITA-CIMA: Figura 4 Principais armadores de navios porta-contentores.

DIREITA-CENTRO: Figura 5 A estratégia portuária da China face ao Ocidente.

DIREITA-BAIXO: Figura 6 Importações da China para a União Europeia.

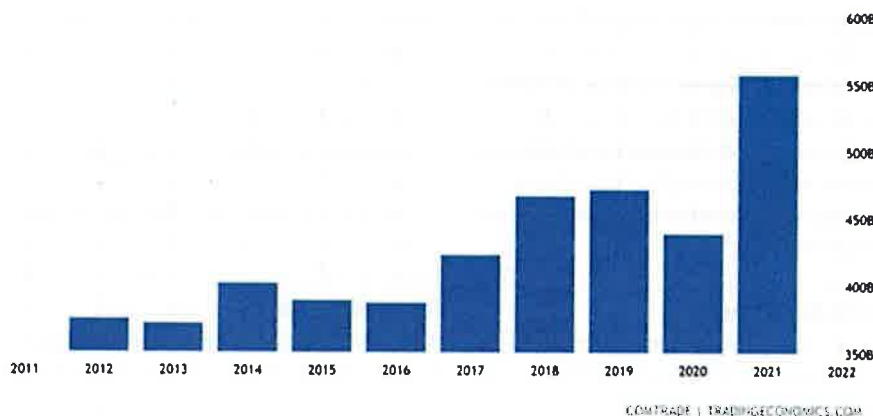
**The Largest Container Ship Fleets**

Leading container shipping companies worldwide based on number of ships



As of June 19, 2017  
StatistaCharts Source: Alphaliner

statista



para o escoamento da produção chinesa, que a China tem comprado diversos portos pelo mundo, garantindo assim a sua eficiência e escoamento. As importações da União Europeia provenientes da China foram de 557,31 mil milhões de dólares durante 2021, de acordo com a base de dados COMTRADE das Nações Unidas sobre comércio internacional. Tal facto, é resultado de um franco

desequilíbrio comercial e da capacidade produtiva instalada na Ásia relativamente ao Ocidente, bem como da capacidade de consumo do Ocidente. Como se pode verificar, as principais rotas ligam as principais cidades da Ásia à Europa e aos EUA. Pode-se concluir que as principais rotas mundiais de navegação da marinha de comércio respondem às neces-

**DIREITA-CIMA:** Figura 7 Principais rotas de navegação mundiais. (fonte: World Shipping News).  
**DIREITA-BAIXO:** Figura 8 A evolução do "shipping" ao longo do tempo.

sidades do comércio mundial e dos países importadores e exportadores, procura e oferta denotando um modelo económico pouco saudável para o planeta.

## 2.2 PRINCIPAIS ROTAS MARÍTIMAS MUNDIAIS

### Estreito de Malaca

Localiza-se na Ásia, entre Singapura e Malásia. Esta autoestrada marítima é a que tem maior volume de transporte de mercadorias. Une importantes mercados —quer de exportação como de importação de mercadorias—como o chinês, sul coreano, japonês, indiano, tailandês, singapureano e malaio. Neste estreito, anualmente passam pelo estreito de Malaca cerca de 50 mil navios, aproximadamente 30% do comércio mundial.

### Canal de Suez

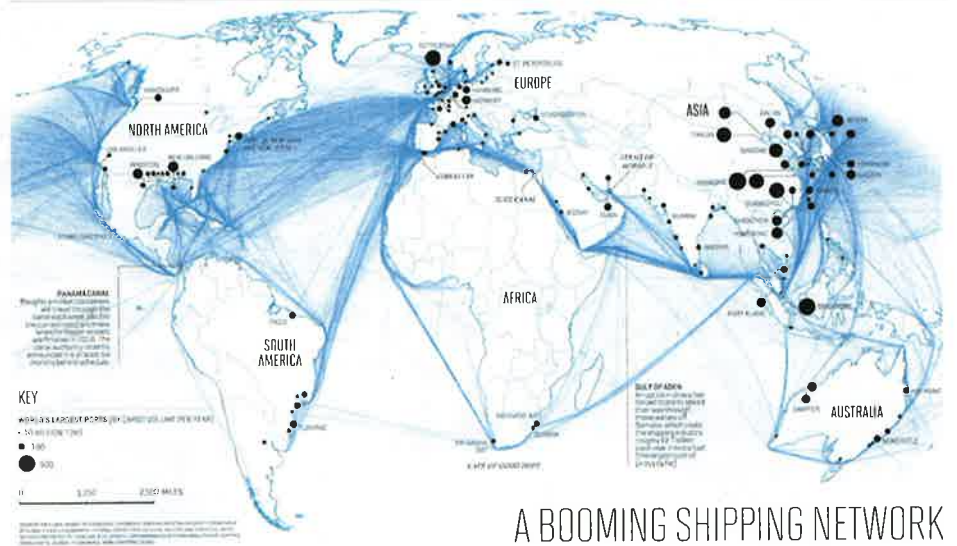
A sua importância reside na ligação que constitui entre o Oceano Índico e o Mar Mediterrâneo, o que evita a circunvalação do continente Africano. Situa-se no Egipto, sendo um canal artificial, construído para agilizar o comércio internacional. Estima-se que 20 mil embarcações transitem por este canal anualmente, cerca de 15% do comércio mundial.

### Estreito de Ormuz

Poder-se-ia defini-lo como o estreito do Golfo Pérsico. Transporta 20% do petróleo de todo o mundo. Separa Oman do Irão, país que tem um grande controlo militar sobre esta área, utilizando-o em ocasiões como ferramenta de negociação em conflitos internacionais. O porto do estreito de Ormuz localiza-se no Dubai.

### Estreito de Gibraltar

Conecta o Mar Mediterrâneo e o Oceano Atlântico. Estima-se que cerca de 80 mil embarcações circulem através dele. É uma localização estratégica de valor incalculável, o que motiva o interesse do



A BOOMING SHIPPING NETWORK



Reino Unido em manter a soberania do Rochedo de Gibraltar. Este estreito separa a África da Europa, com uma distância mínima de 14 km entre os dois.

### Canal do Panamá

Tal como o Canal de Suez, o Canal do Panamá é também uma obra de engenharia realizada no início do século XX. Localiza-se no Mar das Caraíbas, unindo o Oceano Atlântico ao Oceano Pacífico. A construção deste canal, que funciona através de eclusas, resultou num impulso significativo no comércio internacional, reduzindo dramaticamente o tempo no tráfego de mercadorias. Estima-se uma circulação de cerca de 12 mil barcos por este canal.

As rotas marítimas desempenham um papel fundamental no transporte de mercadorias apesar da existência de vias mais rápidas. Ainda assim, o valor económico envolvido no transporte de mercadoria pela via marítima compensa o seu tempo mais demorado, ainda que estratégias para certos percursos e a

própria construção de algumas passagens, tenham contribuído para maior agilidade.

## 2.3 A CARBONIZAÇÃO E A DESCARBONIZAÇÃO DO SHIPPING

Como é fácil imaginar, embora o "shipping" fosse à cerca de um século atrás o mais ecológico meio de transporte, pois utilizava a vela, como principal meio propulsor, a necessidade de ter produtos exóticos e algumas matérias primas para serem processadas no Ocidente, modificou-se com a deslocação dos meios produtivos para o Oriente, assim, também a necessidade de obter tais bens de forma mais rápida obrigou a que a velocidade e posteriormente a dimensão dos navios aumentasse drasticamente.

Interessante é notar, que começando pelo navio a remos, se passou para a propulsão à vela, sendo que com o advento da máquina a vapor, se iniciou a transporte com propulsão mista, vela vapor, tendo sido as rodas descontinuadas devido às dificuldades de manobra que apresentavam, tendo sido substituídas pelo hélice com máquina a vapor, e mais tarde com

máquina diesel, a qual tem durado até aos dias de hoje. No entanto em 1959 foi lançado à água o primeiro navio mercante nuclear, e desactivado em 1972. O SAVANNHA no topo da figura 5, de 181,66 m entre perpendiculares e 23,77 m de boca. O navio poderia percorrer 300 000 nM sem reabastecimento e sem emissões de CO<sub>2</sub>, com uma velocidade de cruzeiro de 24 nós com base num reator de 74 MW.

Nem toda a descarbonização tem a haver com o CO<sub>2</sub> mas também com outros gases resultante da combustão.

Importante é notar que a descarbonização passa pela optimização energética dos navios, pela sua digitalização e pela operacionalidade dos portos.

A vasta maioria dos navios, não tem os seus processos optimizados, e muito menos integrados energeticamente. Por exemplo, na maioria dos navios, as águas quentes sanitárias ou aquecimento de tanques de combustível é conseguido através da utilização de uma caldeira auxiliar com queima extra de combustível e não integrando o calor disponível das máquinas principais e auxiliares, este é um dos exemplos de integração energética. Quanto à digitalização, pode-se dizer que a vasta maioria dos navios, não tem os seus dados operacionais tratados, nomeadamente quanto ao ajuste da velocidade para cumprir um determinado ETA. Quanto aos portos, pode-se dizer que a sua eficiência é fundamental, pois necessitam de o ser para que os navios não percam tempo nas suas operações de carga e descarga, e que por exemplo possam fornecer aos navios energia eléctrica para que lhes permitam parar os geradores, este é um assunto que será mais desenvolvido mais adiante, sob o tema EEXI e CII.

#### 2.4 PORQUÊ DESCARBONIZAR O SHIPPING

A descarbonização tem um significado muito mais abrangente do que se possa pensar. Na realidade, não são só as emissões de CO<sub>2</sub> que estão em jogo, mas

também todas as formas associadas de gases de efeitos de estufa como sejam o metano CH<sub>4</sub> e o óxido nitroso N<sub>2</sub>O, mas também as partículas (que se agrupam em duas classes, as PM10 e a PM2.5 sendo que o número se refere aos respectivos diâmetros medidos em micrometros) e o denominado "Black Carbon" (partículas de alguma dimensão, ou macro partículas) responsável pelo degelo dos glaciares. O óxido nitroso N<sub>2</sub>O, tem um efeito 300 vezes mais negativo que o dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, ambos capturam a radiação infravermelha reflectida (re-irradiada) da superfície da Terra com subsequente aquecimento da troposfera (baixa atmosfera), assim como o metano CH<sub>4</sub>, que tem um efeito cerca de 30 vezes superior ao do CO<sub>2</sub>.

Assim, podemos dizer que temos presente no que diz respeito ao aquecimento global outras espécies químicas que são catalisadoras do aquecimento global que não somente o CO<sub>2</sub>.

No entanto o impacto negativo da queima de combustível pelos navios sobre a vida humana, não se limita aos gases de efeito de estufa, mas às doenças do foro respiratório, muito em particular das populações ribeirinhas e costeiras, estamos a falar das partículas ou matéria particulada.

Num relatório sobre o ambiente da União Europeia, estima-se que as despesas com a saúde na Europa, devido apenas à contribuição das emissões poluentes provenientes do transporte marítimo, aumentem de 7% em 2000 (ou 58,4 mil milhões de euros) para 12% em 2020, atingindo um valor de cerca de 64,1 mil milhões de euros.

Na Dinamarca, que é particularmente afectada pelo intenso tráfego de navios ao longo da sua costa entre o Mar Báltico e o Mar do Norte, a redução do teor de enxofre e dos seus óxidos SOx está a resultar numa diminuição dos custos dos cuidados de saúde. de 627 milhões de euros em 2000 para os 375 milhões de euros esperados em 2020.

Embora estes números digam respeito a 2020, o aumento relativo do número de navios em actividade espera-se que seja na ordem dos 1,1% ao ano, logo estas despesas de saúde irão aumentar.

Assim, pode-se concluir que as emissões nocivas dos navios que operam na Europa atingiram o máximo dos últimos três anos, à medida que a indústria se aproxima dos níveis pré-pandémicos, (segundo ONG Transport & Environment (T&E)).

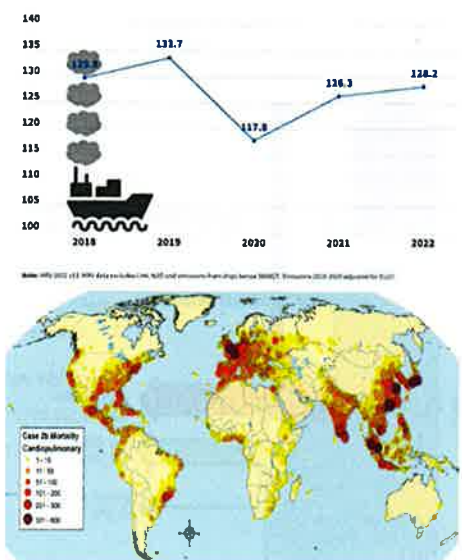
Um estudo realizado pelo Dr. James Corbett, concluiu que as emissões de partículas provenientes de navios em todo o mundo foram responsáveis por cerca de 60.000 mortes em 2007, sendo as populações mais afectadas as populações costeiras, particularmente na Europa e no Sul da Ásia.

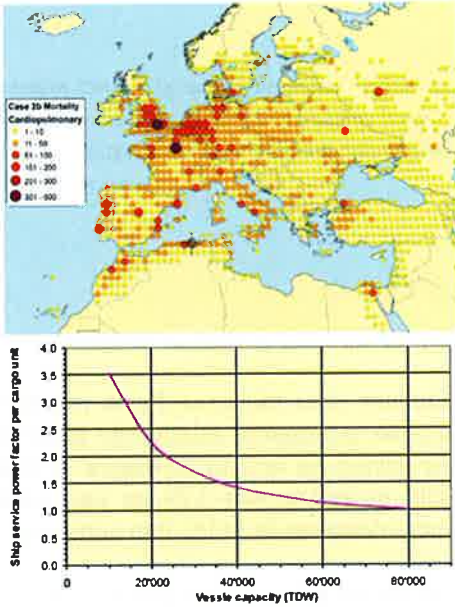
Figure 9 Evolução da poluição originada pelo shipping em função do tempo em toneladas MtCO<sub>2</sub>, baseada em dados do MRV. (fonte: E&T)

Figura 10 Mortalidade devida ao shipping por doença do coração e ou pulmonar (por milha quadrada).

Figura 11 Mortalidade (por milha quadrada) devido às emissões marítimas de PM<sub>2,5</sub> na Europa Ocidental e no mar Mediterrâneo em 2002.

Figura 12 Factor de potência em serviço por unidade de carga em função dimensão do navio.





ESQUERDA-CIMA: Figura 9 Evolução da poluição originada pelo shipping em função do tempo em toneladas MtCO<sub>2</sub> baseada em dados do MRV. (fonte: E&T)

ESQUERDA-BAIXO: Figura 10 Mortalidade devida ao shipping por doença do coração e ou pulmonar (por milha quadrada).

Tanques de combustível	Energia Química	$\eta = \frac{E_{\text{Eixo}}}{E_{\text{Qtd}}} = \frac{W_{\text{helic}} \times \text{Velocidade de rota\c{c}o}}{W_{\text{combust}} \times PCI}$
Máquinas principais	Energia Mecânica	$\eta = \frac{E_{\text{Eixo}}}{E_{\text{Qtd}}} = \frac{W_{\text{helic}} \times PCI}{P_{\text{resista}} \times \text{Velocidade}}$
Hélice	Energia Hidráulica	$\eta = \frac{E_{\text{Eixo}}}{E_{\text{Qtd}}} = \frac{\text{Pressão hidr.} \times \text{Velocidade}}{\text{Impulso} \times \text{Velocidade de rota\c{c}o}}$
Casco	Energia Mecânica	

Tabela 1 Conversão de energia química em mecânica, mecânica em hidráulica e hidráulica em mecânica.

### 3 RELAÇÃO POTÊNCIA, VELOCIDADE E EMISSÕES

#### 3.1 RELAÇÕES IMPORTANTES

O sistema energético do navio pode ser caracterizado por um número de conversões de energia em série e em paralelo dependendo do grau de integração dos fluxos de energia instalados. Na figura 13, está representado um diagrama de Sankey, que ilustra a “magnitude” das perdas de energia de um motor marítimo moderno a 2 tempos. Note-se, uma instalação com este motor pode converter em energia a ser entregue ao hélice 54,2% da energia total consumida, mas muitos outros fluxos de energia deveriam ser aproveitados para outros serviços auxiliares do navio, integrando assim resultará num aumento do rendimento energético do navio assim como na redução das emissões atmosféricas, nomeadamente CO<sub>2</sub>.

Assim, e tal como referido anteriormente para consumir menos combustível tendo o mesmo desempenho existe a necessidade de integrar dinamicamente (Systems Dynamic Matching) esses sistemas de conversão de energia de uma forma otimizada.

Conforme a tabela acima, a Energia química do combustível é convertida em Energia Mecânica na máquina principal, e a Energia Mecânica é posteriormente convertida em Energia Hidráulica pelo hélice, esta por sua vez é convertida em Energia Mecânica que impulsiona o casco através da água a uma certa velocidade. O objectivo destas relações neste texto, é o de evidenciar os diversos sistemas de conversão de energia que que influenciam o bom desempenho do navio e sua operação.

O mantimento do rendimento daqueles

sistemas de conversão de energia, obriga à monitorização dos seus desempenhos relativos, com referências, de forma a estabelecer comparações temporais e determinar a amplitude dos desvios e respectivas correcções.

A melhor condição de referência para um navio existente é quando ela sai da doca seca, com casco limpo, hélice polido e instalação propulsora revista, os benefícios compensam amplamente os custos.

A potência total produzida pelo combustível na camara de combustão do motor Diesel e transmitida á caixa redutora ou ao veio intermédio no caso de uma instalação de acoplamento directo, é dada por:

$$P_{\text{Efectiva}} (kW) = \frac{Z \times IMEP (\text{bar}) \times L (\text{m}) \times A (\text{m}^2) \times N (2\pi) \times 10K}{6}$$

Onde:

Z número de cilindros

IMEP Pressão média efectiva indicada (bar)

L curso (m)

A área do cilindro (m<sup>2</sup>)

N rotações por minuto

K<sup>1/2</sup> para motores a 4 tempos (típicos de navios militares e outros de pequeno porte), ou 1 para motores a dois tempos (típicos de navios mercantes de grande porte)

De onde pode concluir que quanto maior for IMEP maior vai ser a potência desenvolvida pela máquina principal. Normalmente, para um avanço à injeccção constante, a potência desenvolvida depende da quantidade de combustível injectado por ciclo.

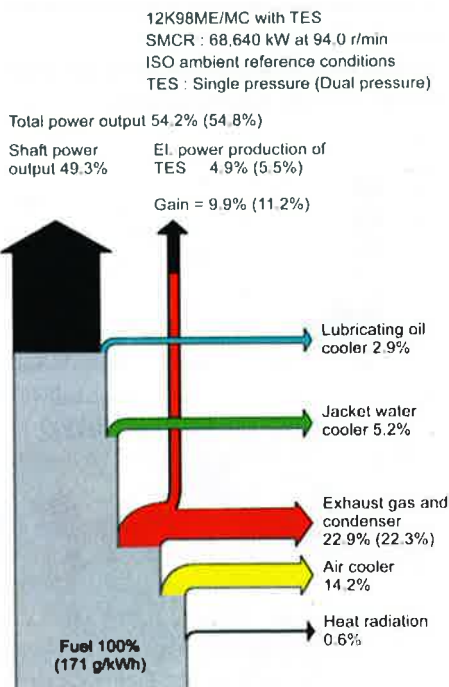
A potência transmitida pelo veio propulsor ao hélice, é igual ao produto do binário transmitido pelo veio e da

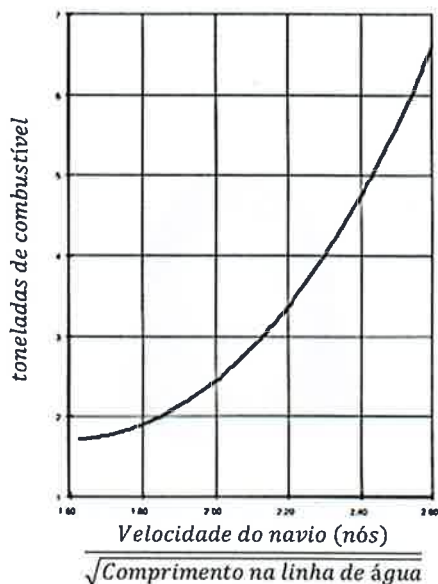
#### FLUXOS DE CARGA

Uma forma de manter os escoamentos de carga para satisfação dos mercados, passa pelo aumento da velocidade ou pelo aumento da capacidade de carga dos navios numa certa rota. Essa característica influencia em particular factor de potência em serviço por unidade de carga.

Assim, um navio de 80.000 DWT requer 3,5 vezes menos energia por unidade de carga do que um navio de 10 000 DWT à mesma velocidade! Por consequência os navios tendem a ser cada vez maiores, dessa forma, tornam-se mais amigos do meio ambiente permitindo menores factores de potência para um mesmo frete.

Figura 13 Diagrama de “Sankey” de um motor propulsor a 2 tempos (Fonte: MAN)





velocidade de rotação do mesmo:

$$P_s(kW) = Q(Nm) \times \frac{2\pi n(rpm)}{60}$$

Sendo que o binário  $Q(Nm)$  é directamente proporcional ao consumo de combustível e a

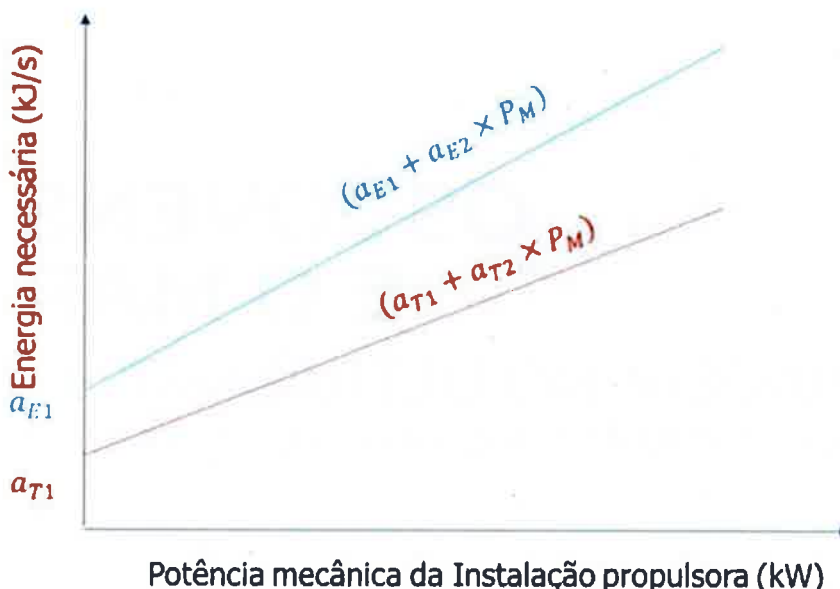
potência efectiva é igual ao produto da resistência ao avanço pela velocidade de avanço:

$$P_s(kW) = T(kN) \times V_s(m/s)$$

Um aspecto interessante e algo não muito lógico, em particular no caso de navios não militares, é a contratualização da construção considerar a velocidade de prova. Para atingir tal objectivo, o casamento da máquina principal com hélice é obtido para uma condição de velocidade que não mais ocorrerá.

### 3.2 "SLOW STEAMING" E OS EFEITOS COMBINADOS

Ao considerar os efeitos combinados da redução da velocidade no consumo de combustível de um navio, é muito importante lembrar que a variação no consumo de combustível do motor por hora não tem interesse real. Todas as operações do navio exigem que o navio se desloque de um porto para outro, ou simplesmente no caso de um navio militar patrulhe uma determinada área do oceano. Portanto, o factor importante é a quantidade de combustível utilizada para percorrer uma distância fixa, ou o consumo de combustível por milha náutica (Mn). O consumo de combustível por milha náutica mostra não apenas como o



desempenho do motor muda com a velocidade, mas também as interações do hélice e do casco que não são evidentes nos dados de consumo horário de combustível.

No caso da adopção de uma velocidade de navegação mais baixa, o novo consumo de combustível pode ser calculado de forma aproximada da seguinte forma

$$m_{fuel\ 2} = m_{fuel\ 1} \times \left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}}\right)^2$$

Onde:

- $m_{fuel\ 1}$  Consumo original de combustível (kg/Mn)
- $V_{s1}$  Velocidade original do navio (nós)
- $m_{fuel\ 2}$  Novo consumo de combustível (kg/Mn)
- $V_{s2}$  Nova velocidade do navio (nós)

Como se pode verificar pela figura 14, mesmo que o navio esteja parado, existe um consumo que é devido ao consumo de energia dos sistemas auxiliares em funcionamento.

A energia que entra a bordo, é tipicamente dividida em dois, respectivamente para energia propulsora e para energia auxiliar. Necessariamente a energia auxiliar, aumenta quando a navegar, mas mesmo que o navio esteja ao cais, existe sempre um determinado consumo quer de energia eléctrica quer de energia térmica.

Assim,

$$E_T = E_p + E_A$$

ESQUERDA: Figura 14 Relação consumo de combustível velocidade.

DIREITA: Figura 15 Composição das necessidades de energia de um navio.

Onde:

- PM Potencia mecânica da instalação propulsora;
- ET Energia total (química);
- EP Energia para propulsão,  $E_{PT} + E_{PE}$
- EA Energia para sistemas auxiliares,

$$E_{AT} + E_{AE} = (a_{T1} + a_{T2} \times P_M) + (a_{E1} + a_{E2} \times P_M)$$

De onde se pode concluir, que mesmo que o navio, não esteja a navegar, por exemplo em porto ou fundeado, existe sempre necessidade de energia auxiliar eléctrica e térmica.

As necessidades de energia são permanentes, conforme se pode verificar pelo gráfico da figura 15, mesmo que atracado, existe necessidade de energia eléctrica para sistemas como o ar condicionado, bombas auxiliares e iluminação entre outros sistemas, sendo que a navegar, à medida que a potência aumenta o consumo de combustível das máquinas principais, ventiladores da casa da máquina, aquecimento de tanques de bancas, etc.

**(CONTINUA)**