

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS



PNV 2324 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

CAPÍTULO 2

Prof. Dr. Hernani Luiz Brinati
Março de 2019

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

Conteúdo

Índice de Figuras	6
Índice de Tabelas	9
Prefácio.....	10
1. Projeto de Instalações Propulsoras.....	12
1.1 Introdução.....	12
1.2 Questão Ilustrativa	12
Análise da Questão	14
Item a.....	16
Item b.....	18
Item c.....	20
Item d.....	21
1.3 Questões Básicas	21
1.4 Projeto do Navio.....	22
1.5 Definições de Potências e Coeficientes.....	24
1.6 Procedimento de Projeto para Instalações Propulsoras.....	27
1.6.1 Cálculo da Resistência.....	31
1.6.2 Condições de Projeto.....	32
1.6.3 Projeto de Hélice: Uso de Séries Sistemáticas.....	33
Cavitação	39
1.6.4 Seleção da Máquina Principal	40
Referências Bibliográficas	42
Lista de Exercícios.....	44
Anexo 1.1 - Procedimentos para Cálculo de Resistência	47
A) Método de Holtrop	47
B) Séries Sistemáticas: Série de Taylor	48
C) Ensaios com Modelos	50
Anexo 1.2 - Cálculo de Parâmetros Propulsivos.....	51
A) Método Holtrop	51
B) Séries Sistemáticas: Série de Taylor	52
C) Ensaios com Modelos	52
Anexo 1.3 - Escolha da Instalação Propulsora	55
A.3.1 Tipos de Instalação Propulsora	55
A.3.2 Características Gerais das Instalações Propulsoras	57
Confiabilidade	58



CAPÍTULO 2

DEMANDA DE POTÊNCIA PARA MOTORES

Neste capítulo serão apresentados conceitos básicos relacionados com a demanda de potência de um navio, e as implicações sobre os requisitos dos motores de propulsão. É examinado, em particular, como as características de projeto dos modernos navios porta contêineres estabelecem requisitos sobre os motores Diesel de baixa rotação. É apresentada inicialmente uma questão ilustrativa para, em seguida, abordar o tema de uma forma estruturada.

2.1 Questão Ilustrativa

Um dos objetivos considerados no projeto da instalação propulsora de um navio é a minimização da potência instalada para proporcionar ao navio a velocidade desejada. Assim, procura-se utilizar o maior diâmetro possível para o hélice e o motor escolhido deve ter rotação compatível com a rotação ótima do hélice.

Um estudo feito para navios super petroleiros (de 300.000 Tdwt), mostrou que a potência requerida pelo hélice para assegurar a velocidade de 15 nos ao navio pode ser expressa por:

$$\text{Potência} = k_1 N^{0,3} \quad (2.1)$$

onde N é a rotação ótima para um dado diâmetro do hélice.

a) Interpretar a expressão apresentada; quando esta função tem o mínimo?

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

Para atender os requisitos os requisitos de menores rotações do hélice, os fabricantes de motores de baixa rotação são obrigados a alterar a geometria do projeto, variando especialmente a relação curso/diâmetro (L/D).

b) Mostrar, inicialmente, que a potência do motor pode ser colocada na forma

$$\text{Pot} = K_2 (p.m.e)_f V_p^3 (1/N^2) (1/(L/D)^2) \quad (2.2)$$

onde $(p.m.e)_f$ é a pressão média efetiva no freio \bar{V}_p é a velocidade média do pistão.

c) Mostrar que uma redução da rotação do motor para satisfazer o requisito de potência e rotação do hélice implica em um aumento da relação L/D.

d) Mostrar também que um aumento de $(p.m.e)_f$ para mesma potência e velocidade implica em aumento da relação L/D.

Análise da Questão

Antes de passar ao exame dos itens propostos, inicia-se a análise da questão pelas informações apresentadas em seu enunciado. Na verdade, o correto entendimento do enunciado é elemento básico para solução da questão. Dois aspectos precisam se entendidos, o primeiro se refere à demanda de potência da máquina principal para uma dada velocidade do navio e o outro está relacionado com a forma com que o motor Diesel pode suprir esta potência.

Item (a)

A expressão apresentada $\text{Potência} = k_1 N^{0,3}$, como mencionado acima, indica a potência requerida de um motor Diesel de baixa rotação, como função da rotação do hélice, para que navios super petroleiros (de 300.000 Tdw) possam atingir a velocidade de 15 nós. Verifica-se, assim, que a potência requerida aumenta com o aumento da rotação. Este é um resultado esperado, pelo menos qualitativamente, porque quanto maior for o diâmetro do hélice menor será a sua rotação. E, como se sabe, hélices de maior diâmetro (menor rotação) têm maior eficiência e, em conseqüência, a potência requerida da máquina principal é menor. O mínimo de potência dado por esta expressão,

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

em termos de engenharia, ocorre quando se atinge o limite para o diâmetro do propulsor. Na maioria dos casos, o limite é estabelecido pelas folgas existentes na popa do navio e corresponde a uma fração do calado de projeto – 60 a 70 %. Para navios de grande porte, porém, o limite pode ser fixado por questões de segurança ou de viabilidade de construção.

Item (b)

Sabe-se que a potência desenvolvida por um motor - $(Pot)_m$ - é dada por:

$$(Pot)_m = (p.m.e.)_f A.L. z. N/x \quad (2.3)$$

onde :

- $(pme)_f$ é a pressão média efetiva (pressão que atua sobre o pistão durante o ciclo) no freio;
- A é a área do pistão ($\pi D^2/4$), sendo D o diâmetro do cilindro;
- L é o curso do pistão;
- Z é o número de cilindros do motor;
- N/x é o número de ciclos de trabalho no cilindro por unidade de tempo;
- N é a rotação do eixo do motor;
- x é um fator que depende do ciclo de operação do motor - para motores de 2 tempos (2T) $x=1$; e para motores de 4 tempos (4T) $x=2$;

Sabe-se também que a velocidade média do pistão (V_p) pode ser expressa em função do curso do pistão e da rotação do eixo: $V_p = 2 N L$. Pode-se, então, multiplicar (2.3) por $(V_p)^2 / (2NL)^2$ sem alterar o seu resultado. Obtém-se, então:

$$(Pot)_m = [(p.m.e.)_f A.L. z. N/x] [(V_p)^2 / (2NL)^2] \quad (2.4)$$

que pode ser colocado na forma:

$$(Pot)_m = [(p.m.e.)_f (\pi D^2/4).. z. /2x] [(V_p)^3 / (2NL)^2]$$

ou, então:

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

$$(\text{Pot})_m = k_2 (\text{p.m.e.})_f 1/(D^2/L^2) (1/N^2) (V_p)^3 \quad (2.5)$$

Desta forma, obtém-se a expressão procurada, que mostra que a potência do motor depende da pressão média efetiva, da razão curso-diâmetro (geometria do cilindro), da velocidade média do pistão e da rotação do eixo.

Item (c)

A potência desenvolvida pelo motor deve ser igual à potência requerida pelo hélice. Assim, da igualdade das equações (2.1) e (2.2) resulta que:

$$k_2 (\text{p.m.e.})_f 1/(D^2/L^2) (1/N^2) (V_p)^3 = \text{Potência} = k_1 N^{0,3} \quad (2.6)$$

Admitindo que os valores dos parâmetros operacionais - V_p e $(\text{p.m.e.})_f$ - estão fixados pelo projeto, vem:

$$(L/D)^2 = k_2/k_1 (\text{p.m.e.})_f V_p (1/N^2) (1/N^{0,3})$$

ou

$$(L/D)^2 = k_3 (1/N^{2,3}) \quad (2.7)$$

Portanto, quando se tem baixa rotação de projeto do hélice, como é o caso dos navios super petroleiros, há um aumento da razão curso diâmetro dos cilindros do motor. O inverso ocorre para os navios porta contêineres, cujos hélices de menor diâmetro trabalham com rotações mais altas; os motores para este tipo de navio têm cilindros com menor razão curso diâmetro.

Item (d)

Para analisar este item, recorre-se à equação (2.6). Pode-se verificar que mantendo - se constante a rotação do eixo e aumentando - se a pressão média efetiva no freio, há um aumento da razão curso diâmetro.

2.2 Relação entre Potência, Deslocamento e Velocidade

Ao se analisar o problema da seleção da instalação propulsora deve-se levar em consideração que ela está inserida em um contexto bem mais complexo

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

que é o projeto do navio. A potência depende de uma série de características que o navio requer para cumprir seus objetivos.

A potência requerida para a propulsão de um navio depende de uma série de fatores relacionados ao casco e aos elementos propulsores. As formas hidrodinâmicas do casco devem ser convenientes para permitir que se atinja a velocidade requerida, com um consumo mínimo de potência e garantindo uma boa estabilidade.

Atualmente os navios que exigem maior potência da máquina principal são os porta contêineres, essencialmente devido aos altos valores de velocidade deste tipo de navio. A potência requerida da máquina principal, como já apresentado no capítulo 1, pode ser obtida em função de 2 parâmetros: deslocamento do navio, Δ , e velocidade de projeto, V :

$$Pot. = k \times \Delta^{\frac{2}{3}} \times V^3 \quad (2.8)$$

em que o coeficiente k é o chamado coeficiente de almirantado.

A equação (2.8), embora simplificada, mostra um fato relevante: o aumento de velocidade dos navios, mais do que de seu porte, é que determina o aumento da potência das instalações propulsoras, o que leva também ao aumento de consumo de combustível. É isto que explica porque, hoje, os navios que exigem motores de potência mais elevada são os porta contêineres, de deslocamento próximo de 100.000 toneladas, mas com velocidades muito altas, e não os super petroleiros de grande deslocamento, porém, de baixa velocidade.

Como ilustração, apresenta-se uma comparação entre as potências requeridas por um navio porta contêineres de cerca de 120.000 toneladas de deslocamento (11.000 TEU) e velocidade de 25 nós e um petroleiro de 300.000 toneladas de deslocamento (250.000 dwt de carga) e velocidade 15 nós.

Para efetuar a comparação, utiliza-se a equação (2.8), admitindo como aproximação que a constante k possa ser empregada indistintamente para os dois tipos de navio (na realidade, a constante vale para navios semelhantes).

Pode-se escrever, então:

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

$$\frac{(Pot)_{Pc}}{(Pot)_{Pt}} = \left(\frac{\Delta_{Pc}}{\Delta_{Pt}} \right)^{2/3} \times \left(\frac{V_{Pc}}{V_{Pt}} \right)^3$$

onde os sub índices Pc e Pt se referem à porta contêiner e petroleiro, respectivamente.

Utilizando os valores de deslocamento e velocidade para efetuar a comparação de potência, obtém-se:

$$\frac{(Pot)_{Pc}}{(Pot)_{Pt}} = \left(\frac{120.000}{3000.000} \right)^{2/3} \times \left(\frac{25}{15} \right)^3$$

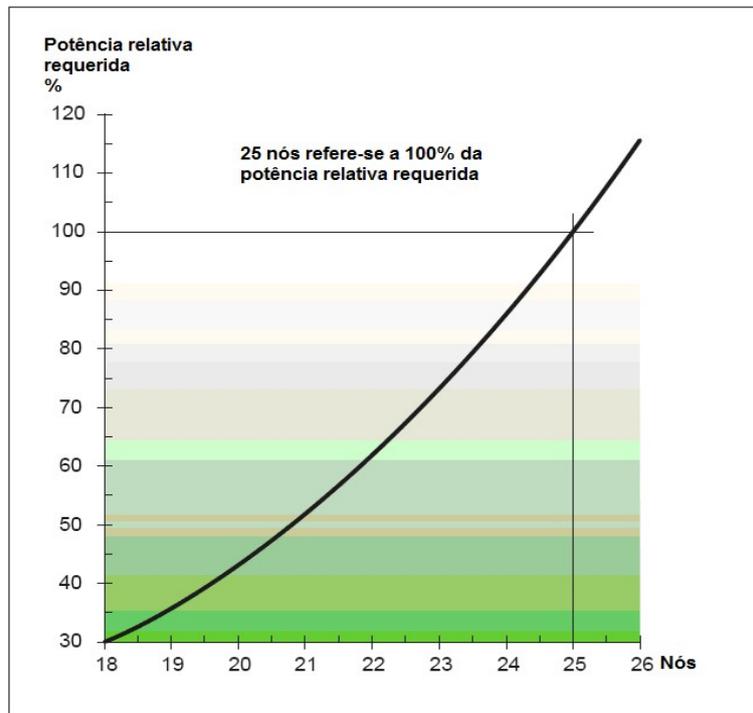
$$(Pot)_{Pc} = 2,6(Pot)_{Pt}$$

Como se pode observar, a potência requerida pelo navio porta contêineres é cerca de duas e meia vezes maior que a do petroleiro.

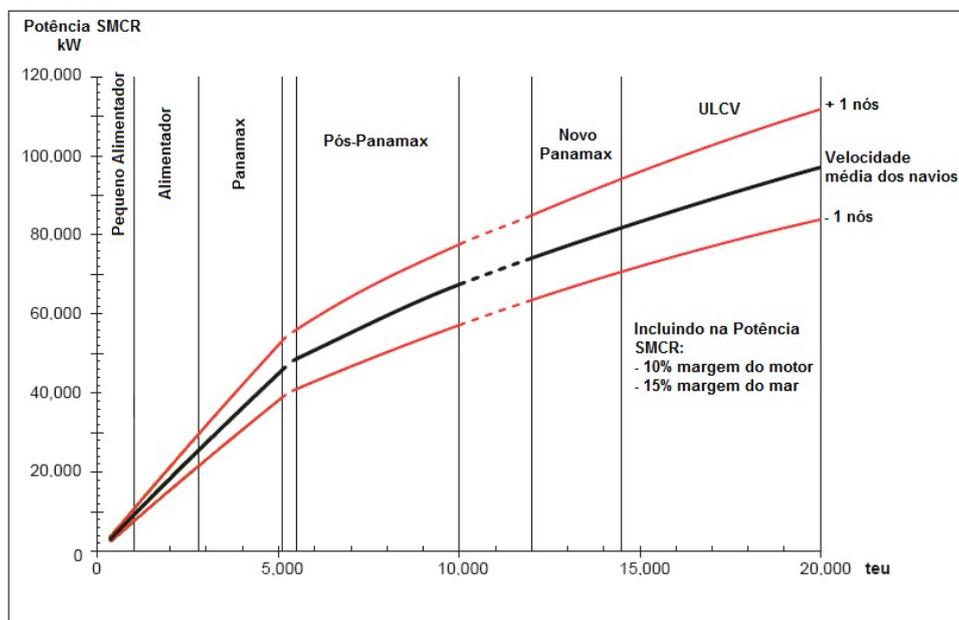
Uma análise do impacto relativo do aumento de velocidade sobre a potência requerida por navios porta contêineres pode ser vista na Figura 2.1. Percebe-se que, com uma redução da velocidade do navio de 25 nós, que é a velocidade de projeto, para 18 nós, a potência requerida cai para 30%.

A Figura 2.2 mostra o efeito do acréscimo ou redução de 1 nó, em relação à velocidade média de projeto, sobre a potência requerida por diferentes categorias de navios porta contêineres. Pode-se observar que esta variação na velocidade tem um efeito significativo sobre a demanda de potência. Este efeito fica mais pronunciado em navios de grande porte que operam com velocidades mais altas.

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS



**Figura 2.1 – Relação entre velocidade e potência
(MAN B&W,[200-]b)**



**Figura 2.2– Efeito da variação de velocidade sobre a potência
(MAN B&W, 2008)**

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

2.3 Requisitos Especiais dos Motores

Os fabricantes de motores Diesel de propulsão marítima tinham como objetivo, especialmente, a partir da segunda crise do petróleo, ocorrida no final da década de 1970, desenvolver equipamentos de alta eficiência térmica – baixo consumo específico de combustível – para atender a demanda dos projetistas e construtores navais. Era, essencialmente, este parâmetro que estabelecia a concorrência entre os principais fabricantes de motores de propulsão marítima de baixa rotação, uma vez que todos os motores já estavam adaptados ao uso de óleo pesado.

Porém, o que se percebe é que a partir de meados da década de 1980, com a evolução de diferentes tendências no transporte marítimo, os fabricantes de motores Diesel de baixa rotação passaram a ter duas preocupações. A questão de eficiência térmica ficou ainda mais reforçada pelo aumento expressivo do custo do combustível e de seu impacto no custo operacional do navio. Modificações significativas foram feitas nos projetos dos motores, que permitiram aumentar a pressão média efetiva, a velocidade média do pistão e, como consequência, a eficiência térmica. Mas os fabricantes passaram a incorporar outro objetivo nos projetos de seus equipamentos: permitir que os propulsores acionados por seus motores operem com a máxima eficiência.

Para assegurar a maior eficiência para o propulsor necessita-se, essencialmente, de adequar a rotação do motor à rotação de projeto do hélice de máximo diâmetro.

É interessante examinar como as demandas distintas de diferentes tipos de navios afetam os projetos dos motores Diesel de baixa rotação. Para ilustração, considere-se mais uma vez a comparação entre o petroleiro e porta contêineres mencionados anteriormente.

Um navio petroleiro de 300.000 toneladas de deslocamento pode ter um calado de 18 m e seu hélice pode ter diâmetro de 10 a 11 m. Como o navio opera com baixa velocidade a resistência ao avanço é relativamente pequena. Como consequência, um hélice de grande diâmetro para desenvolver o empuxo requerido (igual à resistência aumentada) pode operar a uma rotação relativamente baixa, em torno de 70 rpm.

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

Por sua vez, um navio porta contêineres de 11.000 TEU deve ter um calado de 14 m e seu hélice um diâmetro de 8,5 a 9 m. Como o navio opera com alta velocidade a resistência ao avanço é muito alta. Como consequência, um hélice com este diâmetro, para desenvolver o empuxo requerido deve operar a uma rotação mais alta, em torno de 90 a 100 rpm.

Como se pode observar, o motor requerido pelo navio porta contêineres precisa de uma maior rotação que a do petroleiro. Isto implica em diferentes geometrias de motores para conseguir atender às diferentes faixas de rotações requeridas.

Considere-se a potência que pode ser obtida de um motor:

$$Pot = k (p.m.e.) A \times L \times Z \times N \quad (2.9)$$

onde:

- k é uma constante que depende das unidades empregadas;
- $p.m.e.$ é a pressão média efetiva;
- A é a área do pistão;
- L é o curso do pistão (distância de ponto morto superior, PMS, ao ponto morto inferior PMI);
- Z é o número de cilindros;
- N é a rotação do motor.

Na expressão acima, o produto $L \times N$ é metade da velocidade do pistão e como este fator tem influência direta sobre as tensões (de inércia) que atua sobre os componentes dos motores, ele deve ser mantido constante. Assim, os motores com rotação mais alta têm L menor, ou seja, relação curso – diâmetro mais baixa.

É importante lembrar que para estes motores as tensões mecânicas têm duas componentes: tensões devidas à pressão dos gases e tensões de inércia. As tensões de inércia são proporcionais as acelerações que, por sua vez dependem da velocidade média do pistão.

A conclusão sobre a demanda de projetos de motores diferentes para diferentes tipos de navio pode ser observada nas versões dos motores da MAN B&W, S90 produzida para petroleiros e K90 para porta contêineres, que com

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

mesmo diâmetro de cilindro - 900 mm - têm curso do pistão igual a 3.188 mm e 2.300 a 2.870 mm, respectivamente. Os motores S são chamados de motores de curso super longo, relação L/D de aproximadamente 3,5, enquanto os motores K são designados como de curso curto, L/D variando de 2,5 a 3,0. Uma descrição das características destes motores é apresentada na Figura 2.3, onde se mostra o “Layout Diagram” do motor, L1-L2-L3-L4, que é a região de possíveis potências máximas contínuas de contrato, embora L1 estabeleça a máxima potência contínua do motor. São apresentadas diferentes versões destes tipos de motores, ME – versão com comando eletrônico de injeção e descarga, e MC – versão tradicional com acionamento mecânico. A Figura 2.3 apresenta também os diferentes arranjos de cilindros possíveis para cada tipo de motor.

Apresenta-se, em seqüência, a Tabela 2.1 com uma comparação entre as características das duas versões de motores, o S90 para petroleiros e o K90 para porta contêineres.

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

S90

MAN B&W MAN B&W

K90

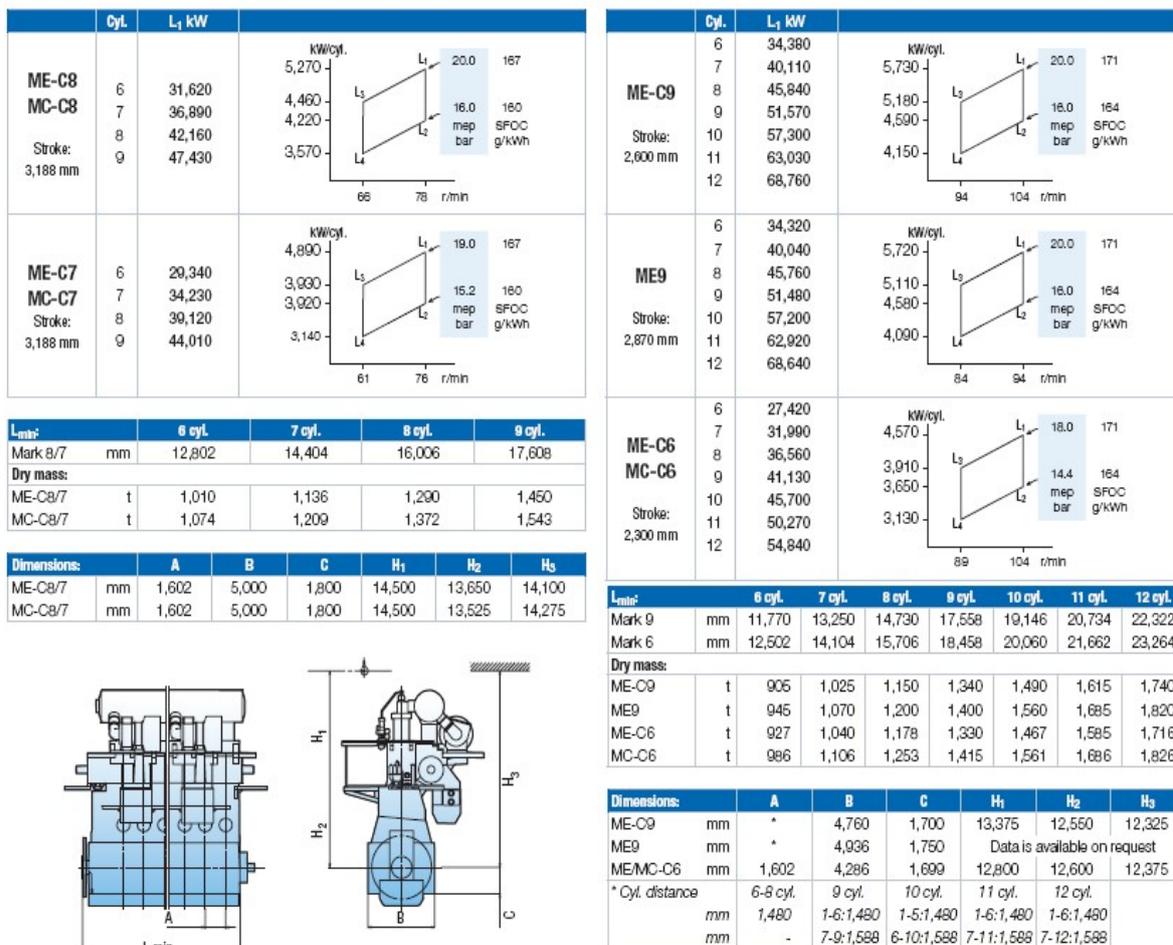


Figura 2.3 – Motores S90 e K90 da MAN B&W (IMO TIER I, 2008)

Pode-se observar na Tabela 2.1 que os motores dos superpetroleiros trabalham com rotações menores que as rotações dos motores dos navios porta contêineres. Isto decorre do requisito imposto pelo hélice; hélices de navios petroleiros operam em rotações inferiores a de hélices dos porta contêineres. Como consequência, os motores para navios superpetroleiros têm curso mais longo para um mesmo diâmetro de cilindro. Deve-se ressaltar que a versão do motor K90 é mais avançada (C9), porque as sucessivas séries de modernos navios porta contêineres assim exigiram, que a do S90 (C8) e por isto tem uma maior velocidade média do pistão.

Outra análise que pode ser feita a partir da tabela é que os motores dos navios porta contêineres são fabricados com uma maior opção de número de cilindros (6 a 12) do que para os petroleiros (6 a 9). Isto ocorre porque eles devem

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

atender uma demanda de potência em uma faixa mais larga, definida pela capacidade de carga e velocidade dos navios porta contêineres.

Verifica-se, por outro lado, que o consumo específico de combustível é maior para os motores dos navios porta contêineres. Isto provavelmente ocorre porque motores com maior razão curso – diâmetro (dos navios superpetroleiros) têm menores perdas térmicas (menor transferência de calor para o fluido de resfriamento), o que garante uma maior eficiência térmica (o consumo específico de combustível é inversamente proporcional à eficiência térmica)

Tabela 2.1 – Características básicas dos motores MAN B&W S90 e K90

Características	Motor para Petroleiros (S90 ME-C8)	Motor para Porta Contêineres (K90 ME-C9)
Potência por cilindro (kW)	5.270	5.730
Potência (kW)	31.620 – 47.430	34.380 – 68.760
Rotação máxima (RPM)	78	104
Curso (mm)	3.188	2.600
Velocidade média do pistão (m/s)	8,3	9
Número de cilindros	6 – 9	6 – 12
Consumo específico em L1 (g/kWh)	167	171

As considerações apresentadas para a comparação acima devem ser entendidas dentro de seus limites. Por exemplo, pode-se observar que para porta contêineres de menor porte e/ou menor velocidade, que exigem menor potência, pode-se empregar os motores de curso super longo, que têm menor

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

consumo específico; é o caso dos motores S50, S40 e S35 da MAN B&W (MAN B&W, 2007).

A seguir é apresentado outro exemplo das diferenças entre características de motores para petroleiros e para porta contêineres, semelhante ao que foi mostrado para os motores da MAN B&W. Na Tabela 2.2 pode se observar os diferentes parâmetros dos motores da Wartsila, RT-flex82T e RTA82T, projetados para petroleiros, e RT-flex82C e RTA82C, destinados a porta contêineres.

Tabela 2.2 – Características básicas dos motores Wartsila, RT-flex82T – RTA82T e RT-flex82C – RTA82C

Características	Petroleiros RT-flex82T e RTA82T	Porta Contêineres RT-flex82C e RTA82C
Potência por cilindro (kW)	4.520	4.520
Potência (kW)	27.120 – 40.680	27.120 – 54.240
Rotação máxima (rpm)	80	102
Curso (mm)	3.375	2.646
Velocidade média do pistão (m/s)	9	9
Número de cilindros	6 – 9	6 – 12
Consumo específico em L1 (g/kWh)	167	171

INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

A exemplo do que foi visto com os motores da MAN B&W, pode-se observar na Tabela 2.2 que os motores RTA-T têm maior razão curso diâmetro, rotações mais baixas, e consumo específico de combustível menor que os RTA-C.

É interessante ressaltar que as comparações feitas com os motores das duas empresas líderes na fabricação de motores marítimos foram feitas com motores que obedecem as normas IMO TIER I. Para atender os padrões mais rígidos de emissão, definidos pelas normas TIER II da IMO, os motores terão consumo específico de combustível mais alto – cerca de 3%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MAN B&W; Marine Engine. IMO TIER I, 2ª Programa. 2008

Núñez Gainza, J.A , Estudo de instalações propulsoras para navios porta contêineres. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

Wärtsilä. Energy Efficiency Ship Design. Fevereiro, 2009