

# **ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE NAVIOS PORTA CONTÊINERES EM VELOCIDADE REDUZIDA**

**Jorge Alberto Nuñez Gainza**

**e-mail: coqui124@hotmail.com**

**Hernani L.Brinati**

**e-mail: hlbrinat@usp.br**

## **RESUMO**

Nos últimos 5 anos, o preço do óleo combustível incrementou-se a níveis sem precedentes. A queda que ocorreu em 2009 pode ser conjuntural e não se pode esperar que os preços permaneçam no patamar atual. Há duas questões que devem ser consideradas no emprego dos motores diesel: a redução do consumo de combustível, que afeta o custo operacional do navio, e a redução das emissões de gases de escape em geral e em particular a emissão de CO<sub>2</sub>.

Apresenta-se neste trabalho um procedimento para analisar o desempenho de uma instalação propulsora Diesel em condições diferentes das de projeto, que permite determinar a rotação e potência requeridas pelo hélice em diferentes velocidades e, em consequência, o consumo total de combustível. Este procedimento possibilita também determinar a demanda de rotação e potência da instalação propulsora para carregamento parcial do navio, que é muito comum no caso de navios porta contêineres. O trabalho apresenta como ilustração a aplicação do procedimento a um navio tipo pequeno alimentador, que atua na costa do Peru.

## **1. INTRODUÇÃO**

Um dos setores do transporte marítimo que tem exibido as maiores mudanças nos últimos anos é de navios porta contêineres. Ocorreu, de fato, um aumento muito grande da carga containerizada, e espera-se que ela continue crescendo a uma taxa pelo menos igual à do comércio e da economia mundial. Outros aspectos relevantes são o aumento do porte dos navios e de suas velocidades, o que leva a um aumento na potência requerida.

Para as atividades de transporte marítimo as despesas com combustível representam uma parcela considerável do custo operacional. Nos últimos 5 anos, o preço do óleo bunker teve

um aumento significativo com forte reflexo nesse item das despesas. Uma questão que, então, se coloca é a viabilidade de alterações nos motores Diesel para redução do consumo específico de combustível. Sabe-se, porém, que as indústrias atingiram provavelmente o patamar máximo de eficiência de seus motores, tanto em plena carga como em cargas parciais. Além do mais, outra questão muito relevante é a de redução das emissões de gases de descarga em geral e, em particular, da emissão de CO<sub>2</sub> e de enxofre, este último característico dos motores que operam com óleo pesado. E as alterações no projeto dos motores para atender esta exigência devem conduzir a um pequeno aumento do consumo específico de combustível dos motores atuais.

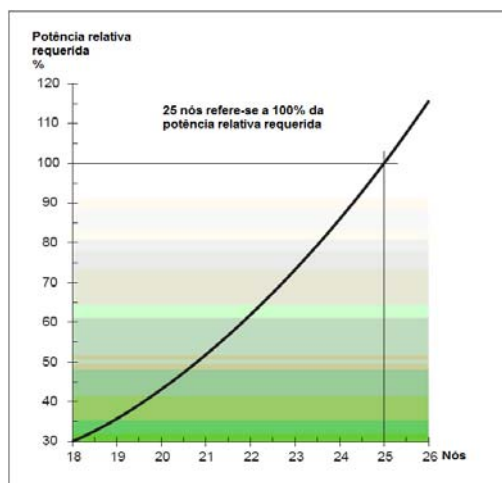
Uma forma de reduzir o consumo total de combustível, bem como das emissões de CO<sub>2</sub>, consiste na redução das velocidades dos navios. A redução da velocidade do navio reduz substancialmente a potência requerida. Desta forma, o motor principal que foi selecionado com potência suficiente para que o navio opere com uma dada velocidade de serviço, vai operar em carga parcial correspondente a nova demanda de potência associada a uma velocidade mais baixa. Esta é a proposta que tem sido colocada no mercado de navios porta contêineres com o objetivo de redução das despesas de combustível.

Com a redução de velocidade, haveria um aumento do período de viagem – número inteiro de semanas – que exigiria que a empresa alocasse mais navios para aquela rota, de modo a atender a demanda de carga. Várias companhias marítimas têm respondido, assim, aos altos preços do combustível com uma variedade de medidas de redução de custos que têm incluído a diminuição da velocidade e a adição de novos navios nas rotas de serviço para uma maior eficácia da programação.

## **2. A EVOLUÇÃO NO PREÇO DO COMBUSTÍVEL**

Para as atividades de transporte marítimo o combustível bunker é um gasto considerável. A elevação no preço do bunker no transporte de contêineres afeta negativamente os ganhos neste tipo de movimentação de mercadorias.

Uma forma de reduzir o consumo de combustível, bem como das emissões de CO<sub>2</sub> pode ser obtida com a redução das velocidades dos navios. A Figura 1 mostra a relação entre a potência e a velocidade de um navio porta-contêiner Post-Panamax.

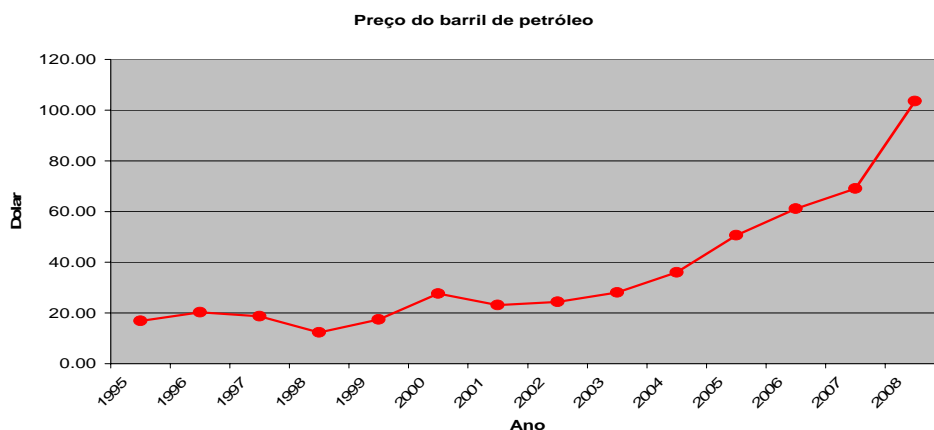


**Figura 1 - Relação entre velocidade e potência (MAN B&W, 200-)**

A redução da velocidade do navio diminui substancialmente a potência requerida do navio, como mostrado na Figura 1. Reduzir a velocidade do navio, por exemplo, em 4 nós, implica em uma redução da potência requerida em quase 50%. Isto significa que se o motor principal foi escolhido com potência suficiente para atingir altas velocidades, ele também deve ser capaz de operar com baixa potência por longos períodos. Esta é a situação na qual os navios em serviço estão expostos e tem que cumprir. Normalmente uma viagem completa demora 8 semanas mas, com a diminuição da velocidade, demora 9 semanas.

Para os novos navios, os projetistas devem decidir se o navio deve operar com altas velocidades, como foi o caso durante vários anos, ou se deverão escolher um projeto alternativo para um navio com velocidade inferior (ou seja, escolhendo um motor principal de menor potência), ou como uma terceira opção, deve-se manter a potência máxima do motor de acordo com as especificações, mas o motor deve ser entregue otimizado para baixas potências. Até agora, os armadores têm optado por manter a flexibilidade no serviço mantendo o projeto prevalecente de alta velocidade.

Os preços do bunker oscilam constantemente devido às forças do mercado e do preço do petróleo cru. Além disso, os preços do combustível variam de um porto para outro, o que torna relevante a decisão sobre em que porto o navio deve ser reabastecido. A Figura 2 ilustra um gráfico do aumento do preço do barril de petróleo ao longo dos anos.



**Figura 2 - Evolução dom preço do petróleo. (Notteboom, T; Vernimmen, B)**

### **3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE**

Os navios porta contêineres muitas vezes trabalham em condições diferentes das de projeto, ou pela variação de deslocamento ou da velocidade. A operação com calado parcial, com exceção para os mega carriers, é comum entre navios da frota, pois em certos trechos da rota o navio transporta um número menor de contêineres. A alteração de velocidade pode ocorrer ou para atender a programação de viagem ou para reduzir os gastos de combustível. É conveniente determinar quais serão as condições de operação da instalação propulsora para diferentes situações, sendo necessário dispor de um procedimento para esta finalidade.

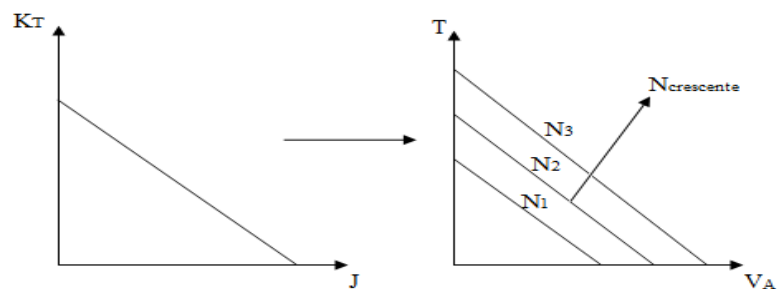
O procedimento descrito a seguir baseia-se na interação entre casco, hélice e motor, empregando curvas características dimensionais para cada um destes elementos. Assim, de forma diversa da utilizada no projeto da instalação propulsora, quando se faz uso de curvas adimensionais do hélice extraídas dos diagramas de séries sistemáticas e adimensionaliza-se a curva de resistência do casco, nesse caso efetua-se a dimensionalização das curvas do hélice.

Com a instalação propulsora já definida, em particular, um hélice com um dado número de pás, razão de área expandida e relação passo diâmetro, dispõe-se das curvas (ou dos polinômios) que representam as constantes de empuxo,  $K_T$  e de torque  $K_Q$  do hélice em função do coeficiente de avanço,  $J$ :

$$K_T = T / \rho N^2 D^4 ; \quad K_Q = Q / \rho N^2 D^5 ; \quad J = V_A / ND$$

onde  $T$  é o empuxo gerado pelo hélice;  $Q$  é o torque do hélice;  $\rho$  é a densidade da água;  $V_A$  é a velocidade de avanço do hélice no meio fluido;  $D$  é o diâmetro do hélice;  $N$  é a rotação do hélice.

A partir da curva (ou do polinômio) da constante de empuxo, podem-se determinar as curvas, parametrizadas na rotação, de empuxo do hélice em função da velocidade de avanço,  $T = f'(V_A)_{N=cte}$  como mostrada na Figura 3.



**Figura 3 – Obtenção de curvas de empuxo do hélice**

Para ilustrar o processo é mostrada, a seguir, a determinação de uma curva  $T = f'(V_A)_{N=cte}$ .

Considere-se a função  $K_T = f(J)$ ; pode-se escrever:

$$\frac{T}{\rho N^2 D^4} = f\left(\frac{V_A}{ND}\right) \quad (1) \quad \text{ou} \quad T = \rho N^2 D^4 f\left(\frac{V_A}{ND}\right) \quad (2)$$

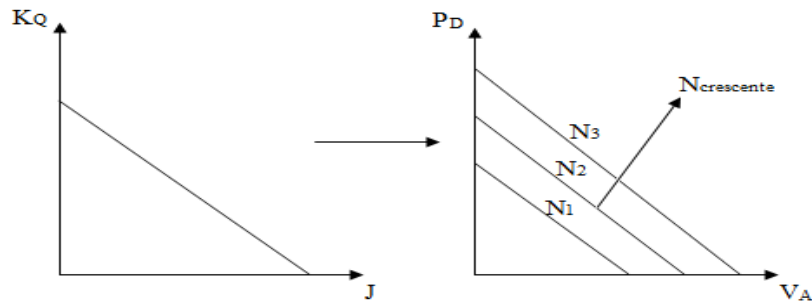
Os valores de  $\rho$ ,  $N$  e  $D$  são constantes; portanto obtêm-se:

$$T = f'(V_A)_{N=cte} \quad (3)$$

Repetindo-se o processo para diferentes valores de rotação do hélice, podem-se transportar para o novo gráfico todas as informações contidas no diagrama  $K_T = f(J)$ . Assim, a função  $T = f'(V_A)_{N=cte}$  tem o mesmo aspecto da função  $K_T = f(J)$ ; por exemplo, se uma função é linear a outra também será.

A Figura 4 mostra a modificação que é efetuada na curva  $K_Q(J)$  do hélice, para efeito de integração com o motor. O método de conversão de um gráfico para outro é análogo ao

descrito anteriormente para o empuxo. Fixada a rotação  $N_1$ , um ponto no gráfico  $K_Q$  vs  $J$  corresponde a uma certa velocidade  $V_A$  e um certo torque  $Q$ . Porém, é mais interessante introduzir uma função que represente não o torque, mas a potência absorvida pelo propulsor. Multiplicando-se o torque por  $2\pi$  vezes a rotação  $N$ , obtém-se a potência absorvida ou entregue ao hélice.



**Figura 4 – Modificação da curva característica do coeficiente de torque do hélice**

De igual forma como foi feito com a curva de empuxo, pode-se mostrar que a função  $K_Q = g'(V_A)_{N=cte}$  tem o mesmo aspecto da função  $K_Q = g(J)$ .

Considere-se a função  $K_Q(J)$ : pode-se escrever:

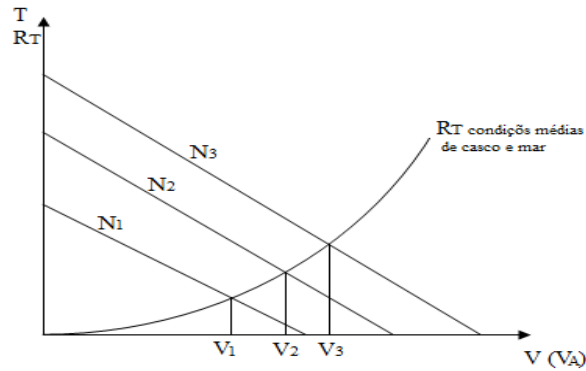
$$\frac{Q}{\rho N^2 D^5} = g\left(\frac{V_A}{ND}\right) \quad \text{ou} \quad Q = (\rho N^2 D^5) g\left(\frac{V_A}{ND}\right) \quad (4)$$

$$P_D = (2\pi\rho N^3 D^5) g\left(\frac{V_A}{ND}\right) \quad (5)$$

Como  $\rho$ ,  $N$  e  $D$  são constantes, obtém-se:

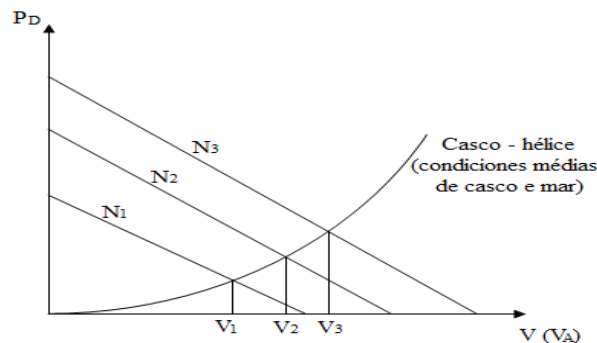
$$P_D = g'(V_A)_{N=cte} \quad (6)$$

Uma vez representadas as características do hélice em termos dimensionais, pode-se efetuar a integração casco hélice para condições de regime permanente. Isto está mostrado na Figura 5 onde, em um gráfico de força versus velocidade, estão representadas as curvas de empuxo líquido do hélice,  $T_l$ , ( $T_l = T(1-t)$ ) e resistência do casco.



**Figura 5 – Integração casco-hélice**

A Figura 5 mostra que só existe uma rotação do hélice que assegura que o navio se desloque a uma determinada velocidade. É evidente que para obter esta velocidade desejada só é possível se o motor fornecer a potência requerida pelo hélice para operar nesse ponto. Precisa-se, portanto, exprimir em termos de potência este primeiro resultado da integração casco – hélice. Com este objetivo são transportadas para o gráfico  $P_D$  vs  $V_A$ , mostrado na Figura 6, as informações obtidas nessa integração. Neste caso efetua-se uma alteração de escala, colocando a potência requerida em função da velocidade do navio.



**Figura 6 – Curva de potência requerida para o conjunto casco-hélice**

Para fazer a integração do conjunto casco - hélice com motor é incluída na Figura 7 a região de operação do motor. Foi adotada uma simplificação do diagrama de carga (load diagram) especificado pelos fabricantes, fixando-se curvas de rotação e pressão média efetiva no freio mínimas e máximas. Para se colocar no mesmo gráfico as características de potência do hélice e do motor é preciso dividir a potência requerida pela eficiência de transmissão ( $e_t$ ), ou seja, a potência é expressa em termos de  $P_b$  requerida.

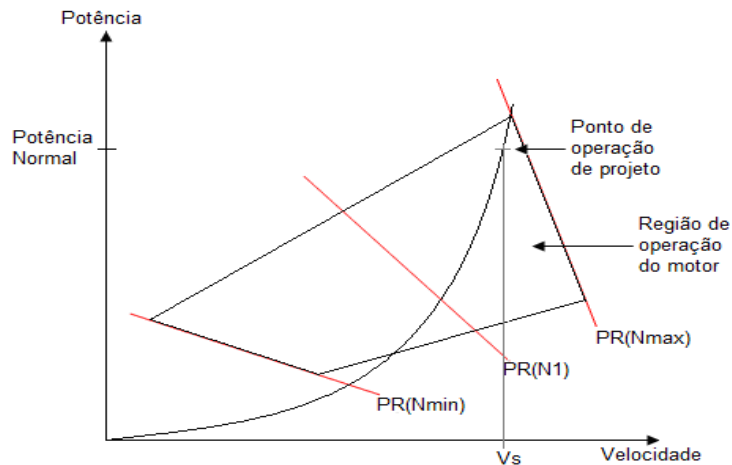


Figura 7 – Integração casco-hélice-motor (PR é potência requerida)

## 4. EXEMPLO ILUSTRATIVO

### 4.1 O navio escolhido

Entre as diferentes opções de navios porta contêineres, decidiu-se trabalhar com um navio Pequeno Alimentador porque um navio deste tipo está previsto para ser construído pelo estaleiro SIMA – Callao (Serviços Industriais da Marinha). Os valores fixados para o projeto são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do Navio

Parâmetros	Projeto
L (m)	154,6
Lpp (m)	154
B (m)	23,89
T (m)	8
Cp	0,68
Cb	0,67
Deslocamento (t)	19.720
Carga (TEU)	800
Velocidade (nós)	18

## 4.2 A instalação propulsora

Foi desenvolvido o projeto da instalação propulsora para este navio. Uma das alternativas selecionadas é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3 – Projeto da instalação propulsora Diesel direta**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
V(nós)	18
RT (kN)	514
$W$	0,27
$T$	0,19
D(m)	5,6
Número de pás	5
Ae/Ao	0,67
P/D	1,2
Eficiência da hélice em água aberta	0,60
Potência requerida (kW)	8.260
N (rpm)	98
Margem de potência do motor	10%
Potência instalada (kW)	9.090
Margem de rotação	3%
N max. (rpm)	101

## 4.3 Análise de desempenho da instalação propulsora

Nesta seção procede-se a análise do desempenho da instalação propulsora para diferentes condições de operação do navio. Esta análise tem como finalidade fornecer informações para avaliar o desempenho técnico e econômico do navio quando opera com carga parcial de contêineres ou com velocidade diferente da de projeto.

### *Variação de deslocamento*

Os navios Pequenos Alimentadores podem operar com deslocamento parcial em determinados trechos de sua rota, já que eles devem transportar carga de (ou para) um porto principal para (ou de) portos menores. É importante saber como a variação do número de contêineres ou do deslocamento do navio afeta a potência requerida. Isto tem um reflexo direto nas despesas com combustível.

Esta análise também pode ser usada para avaliar a conveniência de aumentar a velocidade do navio em condição de carga parcial.

Foram analisados os seguintes casos:

- Deslocamento de projeto;
- 70% de contêineres que, para alguns navios, é a condição real de projeto;
- 50% de contêineres.

Para a realização da análise foram admitidas as seguintes hipóteses:

- a) O deslocamento do navio para carregamento parcial pode ser calculado através de:

$$\Delta_{parcial} = (1 - Cdwt)\Delta_{proj} + (fração\ carregada \times Cdwt \times \Delta_{proj})$$

Onde  $Cdwt$  é coeficiente deadweight;  $\Delta_{parcial}$  é o deslocamento parcial;  $\Delta_{projeto}$  é o deslocamento de projeto;  $fração\ carregada$  é a porcentagem de carga.

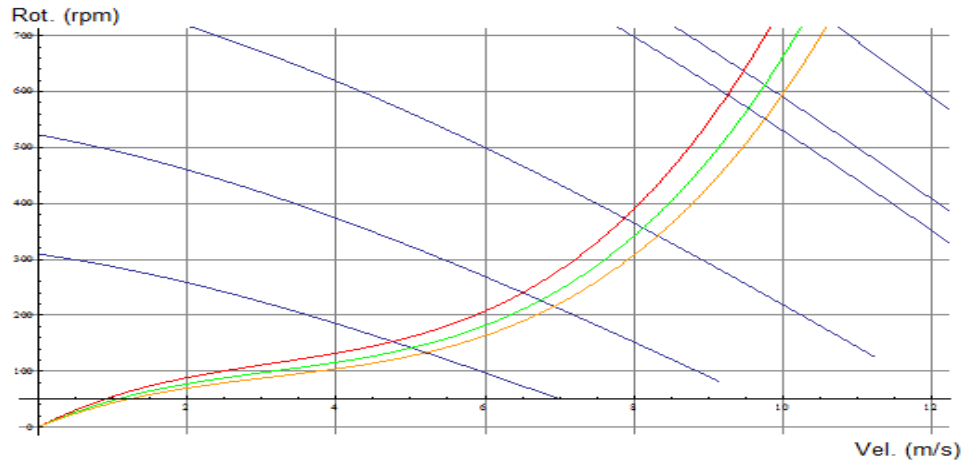
Adotou-se  $Cdwt$  igual a 0,60 (RAWSON J., TUPPER E., 1968)

- b) Admite-se que para uma dada velocidade, a variação da resistência ao avanço em função da variação de deslocamento do navio possa ser calculada por:

$$\frac{(R_T)_{\Delta_{parc}}}{(R_T)_{\Delta_{proj}}} = \left( \frac{\Delta_{parc}}{\Delta_{proj}} \right)^{2/3}$$

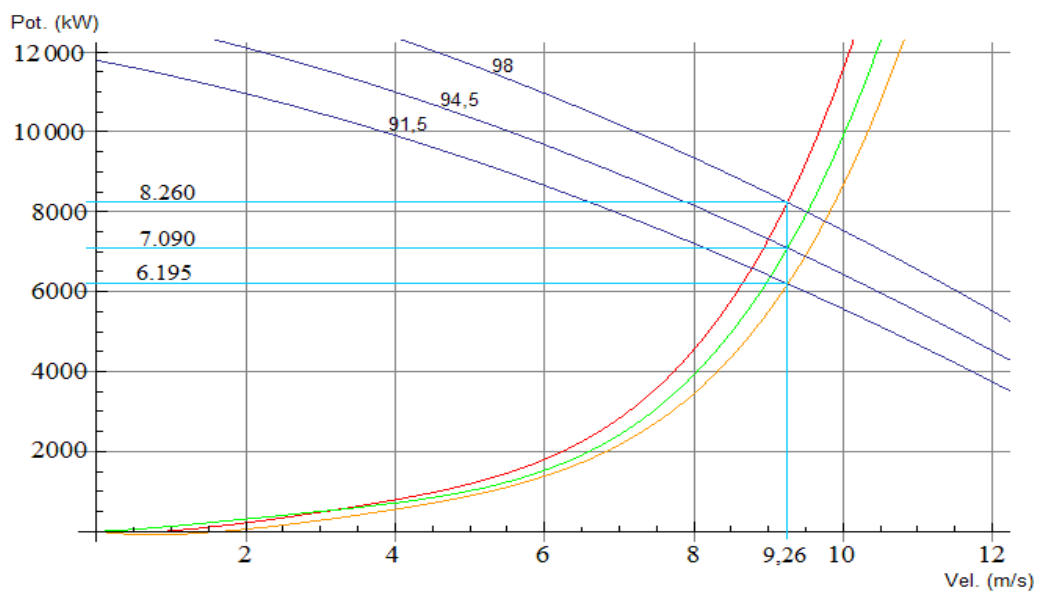
Ressalte-se que esta aproximação é mais razoável para navios lentos, em que a resistência friccional é predominante, mas que não é o caso do navio considerado.

A Figura 8 apresenta as curvas de resistência do casco para os 3 carregamentos considerados em condições médias de casco e mar.



**Figura 8 - Resistência vs velocidade para diferentes deslocamentos do navio**

A Figura 9 mostra as curvas de potência requerida pelo conjunto casco-hélice em função da velocidade para diferentes condições de carregamento do navio: projeto (vermelha), de deslocamento com 70% dos contêineres (verde) e de deslocamento com 50% dos contêineres (laranja). São apresentadas também as curvas de potência requerida pelo hélice para diferentes rotações (em rpm). Estão representadas no diagrama as curvas de rotação em que o hélice opera para que o navio tenha velocidade 18 nós em diferentes condições de carregamento.



**Figura 9 – Gráfico Potência (kW) vs Velocidade (m/s) para diferentes condições de operação**

A Tabela 4 apresenta uma comparação dos principais resultados. Pode-se verificar a variação dos requisitos de potência e de rotação quando se reduz o carregamento, para uma mesma velocidade de serviço.

**Tabela 4 – Desempenho da instalação propulsora para diferentes deslocamentos**

<b>Características</b>	<b>Deslocamento de projeto</b>	<b>Deslocamento 70% da carga</b>	<b>Deslocamento 50% da carga</b>
Velocidade (nós)	18	18	18
Potência (kW)	8.260	7.090	6.195
Rotação (rpm)	98	94.5	91.5

#### *Variação de velocidade*

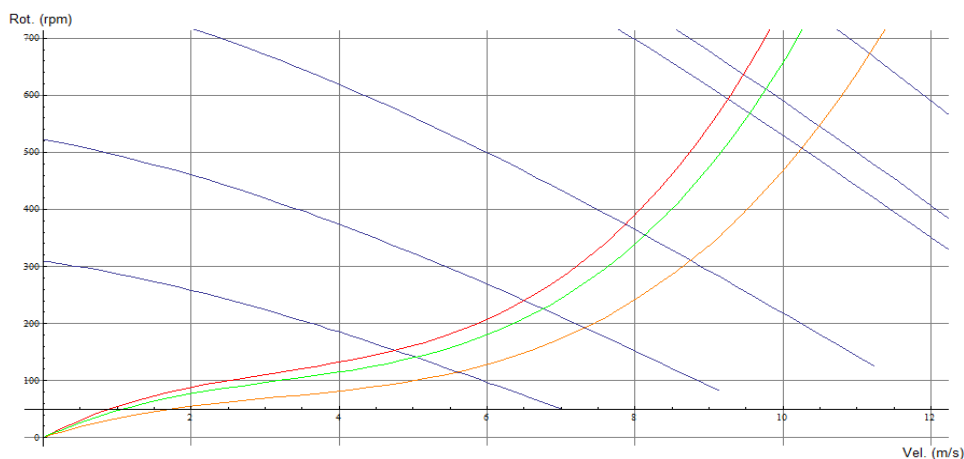
O objetivo desta análise é verificar a variação de potência e dos gastos com combustível decorrentes de aumento ou redução da velocidade. O cálculo de consumo de combustível foi efetuado para uma distância de 1.000 milhas.

Foram consideradas as velocidades de operação apresentadas na Tabela 5, apesar da solicitação feita à MAN, não se conseguiu dados de c.e.c. para diferentes pontos de operação do motor selecionado, admitiu-se que para pontos ao longo da curva do propulsor este motor tem o mesmo comportamento de outros motores de baixa rotação, adotando-se curva apresentada por (POUNDER, C.; 1984).

**Tabela 5 – Cálculo da potência e consumo de combustível para diferentes velocidades**

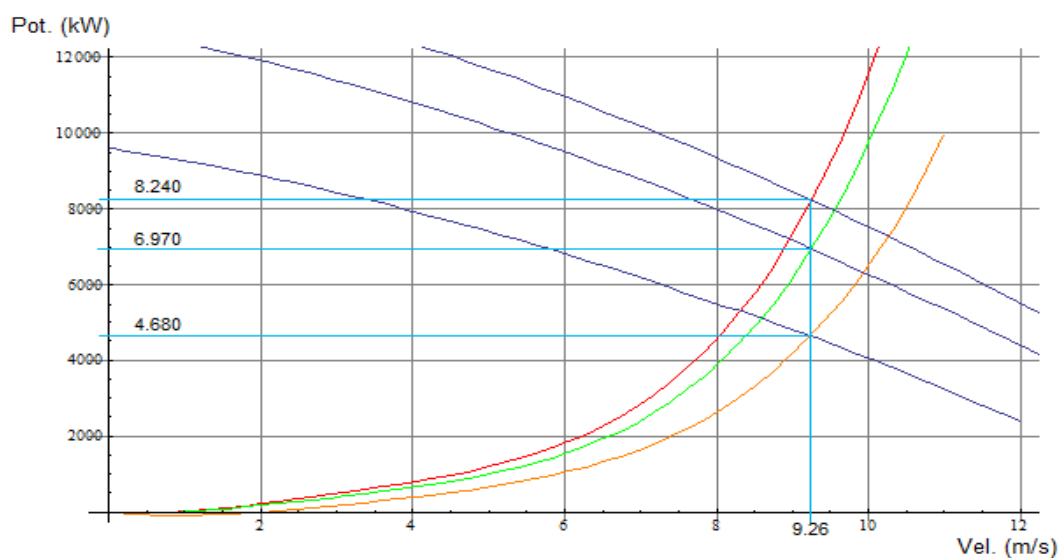
<b>Velocidade (nós)</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Rotação (rpm)</b>	<b>c.e.c. (g/kWh)</b>	<b>Consumo de combustível (ton/viag. red.)</b>
<b>16</b>	5.110	84,5	151	96
<b>16,5</b>	5.700	87,5	154.5	106
<b>17</b>	6.470	91	158	120
<b>17,5</b>	7.320	94,5	163	136
<b>18</b>	8.260	98	170	156
<b>18,5</b>	9.220	101,5	178.5	178





**Figura 11 - Curvas de Resistência diferentes deslocamentos do navio**

A Figura 12 apresenta uma comparação entre os valores de potência para as condições de projeto (curva vermelha), de prova de mar (curva verde) e de prova de mar com deslocamento parcial (curva laranja).



**Figura 12 - Gráfico Potência (kW) vs Velocidade (m/s) para diferentes condições de operação**

Na Figura 12 estão indicados os valores esperados de potência e rotação do eixo para que o navio em prova de mar, em diferentes condições de deslocamento, atinja a velocidade de 18 nós. Este valor deve ser comparado com o resultado obtido na prova de mar como forma de avaliar se a instalação propulsora teve o desempenho especificado no contrato.

Pode-se verificar na Tabela 11, a variação dos requisitos de potência e de rotação na condição de projeto, de prova de mar e prova de mar com deslocamento parcial, para uma mesma velocidade de serviço.

**Tabela 11 – Previsão dos resultados de prova de mar**

<b>Características</b>	<b>Condição de projeto</b>	<b>Prova de mar</b>	<b>Prova de mar deslocam. parcial</b>
Velocidade (nós)	18	18	18
Potência (kW)	8.240	6.970	4.680
Rotação (rpm)	98	94	85.5

## **5. CONCLUSÕES**

Os navios porta-contêineres passaram por grandes mudanças nos últimos anos, com aumento considerável na capacidade de carga e da velocidade de serviço, resultando em aumento considerável da potência requerida, aumentando o consumo de combustível.

Os armadores, junto com os projetistas, deverão analisar a melhor alternativa para diminuir o consumo de combustível do navio. As opções disponíveis são: reduzir a velocidade do navio e aumentar um navio na rota de navegação para cumprir com os prazos de entrega da mercadoria ou otimizar a potência dos motores para menores velocidades.

## **6. REFERENCIAS**

MAN B&W; Low Container Ship Speed Facilitated by Versatile ME/ME-C Engines.

Notteboom, T; Vernimmen, B; The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping. Journal of Transport Geography, 2008

Pounder, C.; Pounder's Marine Diesel Engines, 6th edition. London, 1984.

Núñez, J.; Dissertação de mestrado EPUSP: Estudo de instalações propulsoras para navios porta contêineres, 2009.