

**CAPÍTULO 5**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR**

Prof Hernani Brinati

Janeiro 2019

# PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

## 5.1 Introdução

Em capítulos anteriores do curso foram abordados diversos tópicos que proporcionam ao aluno conhecimentos necessários, para selecionar o motor mais adequado à instalação propulsora de um navio. Neste capítulo será analisado o problema de integração motor – hélice – casco para condições diferentes das de projeto. O exame deste tópico em todos seus detalhes procura dar ao aluno uma perfeita compreensão do comportamento do sistema propulsor. A análise que será feita pressupõe a existência de um sistema propulsor (motor, hélice e, eventualmente, redutor) já definido para o navio, mas as conclusões podem servir como orientação para a escolha do sistema, especialmente quando o navio apresentar condições particulares de operação.

Assim, para um dado navio, o melhor hélice é selecionado em função dos requisitos de velocidade do navio e dos motores disponíveis no mercado. Neste procedimento também é escolhido o motor (motor mais redutor) mais conveniente sob os aspectos técnico e econômico.

A seleção deste sistema é feita, via de regra, para uma única condição de operação, que consiste em fornecer a potência necessária para que o navio, com calado de projeto, se desloque com velocidade de serviço ( $V_s$ ) em condições médias de casco e mar. No entanto, em muitos casos, deseja-se também saber como o sistema propulsor comporta-se em outras condições, diferentes das de projeto. Este comportamento depende de uma interrelação entre três elementos: casco, hélice e motor.

Assim, deseja-se saber como uma modificação das características de qualquer um destes elementos influi sobre as respostas dos outros dois. Por exemplo, se o navio está com deslocamento parcial qual a potência, e correspondente rotação do sistema propulsor, necessária para manter a velocidade  $V_s$ ? Ou, de outra forma, ao se manter a mesma injeção de combustível no motor qual a velocidade que o navio atinge e qual a rotação do hélice? As respostas a estas questões serão alguns dos resultados obtidos com a análise de desempenho do sistema propulsor.

Antes de focalizar o problema de integração motor-hélice será feita uma breve revisão sobre o projeto do sistema propulsor. Para o estudo de integração são escritas as equações do movimento para o sistema. Os diversos termos que aparecem nas equações serão examinados e colocados como função das variáveis independentes (variáveis de estado). Considerando a dificuldade de obter essas funções de forma explícita, e também porque se deseja apenas solução das equações para regime permanente, será empregado um procedimento gráfico para o tratamento do problema. Este procedimento aplica-se a hélice de passo fixo, mas pode ser generalizado para propulsor de passo controlável desde que se tomem certos cuidados.

## 5.2 Questão Ilustrativa

Uma empresa de navegação efetuou a substituição da instalação propulsora de um de seus navios graneleiros depois de 12 anos de vida. Em lugar do motor original, de potência normal 18.000 kW à rotação de 100 rpm, foi selecionado um motor com potência normal 17.500 kW à rotação de 90 rpm. Este motor permite a utilização de um hélice, semelhante ao anterior, porém com diâmetro 5,5% maior, o que proporciona uma maior eficiência do propulsor.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

Na prova de mar efetuada depois da reforma, o navio atingiu a velocidade de serviço, 16 nós, com o motor fornecendo 16.400 kW a 88 rpm. Como a potência consumida na prova de mar, para manter a velocidade  $V_s$ , foi considerada alta, o armador consultou um escritório de projeto para analisar estes dados.

O engenheiro responsável pela análise explicou que a potência relativamente alta requerida na prova de mar era consequência do acréscimo de resistência do casco, devida ao aumento da rugosidade das chapas ao longo do tempo. Assim, mesmo depois de docado e limpo, o navio apresenta um aumento de resistência, devido ao aumento de rugosidade, dado por:

$$\frac{\Delta R_T}{R_T} = \alpha_1 \cdot n \quad (5.1)$$

onde  $n$  é o número de anos.

- Apresentar um procedimento, empregando o diagrama de série sistemática de hélice, para determinar o valor de  $\alpha_1$ .
- Desenvolver um procedimento, empregando gráficos com variáveis dimensionais, para determinar o valor de  $\alpha_1$ .
- Empregando o procedimento desenvolvido, mostrar como se determina a velocidade que o navio atingirá em condições médias de casco e mar?

Adotar as hipóteses que julgar necessárias a resolução da questão. Justificar as respostas, ilustrando a análise com diagramas.

### Análise da Questão

Antes de passar a resposta dos itens propostos, convém ressaltar que, assim como os petroleiros, navios graneleiros, têm carga de alta densidade e operam com baixas velocidades, em torno de 15 a 16 nós, dependendo de sua capacidade de carga. Utilizam, normalmente, motores Diesel de baixa rotação, e os cilindros têm curso super longo.

Embora não seja usual para navios mercantes uma reforma de tal porte em sua instalação propulsora, em alguns momentos da construção naval e do transporte marítimo, decisões deste tipo ocorreram em busca de melhor desempenho técnico- econômico da instalação.

Sabe-se que navios graneleiros têm, em geral, grande calado e, devido à baixa velocidade, resistência ao avanço relativamente pequena. Assim, é possível usando hélice de grande diâmetro (máximo possível), obter eficiência alta do propulsor, reduzindo assim a potência requerida da máquina principal. O emprego destes hélices fica condicionado à disponibilidade de motores que, além de fornecer a potência necessária, possam operar na rotação requerida pelo hélice.

Quando não se encontra um motor que atenda à demanda de rotação é necessário rever o projeto do hélice. O que tem ocorrido é que a rotação de projeto dos motores Diesel tem diminuído a partir da década de 1980, com o esforço das indústrias de motores marítimos de atender a demanda de rotação

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

dos hélices, contribuindo assim para que as instalações propulsoras trabalhem com um coeficiente propulsivo mais alto.

Provavelmente, no caso em questão, a empresa de navegação deve ter percebido a oportunidade de substituir a máquina principal por outra que, com menor rotação, possibilitasse utilizar um hélice de maior diâmetro e, portanto, de maior eficiência. Viu, assim, a possibilidade de reduzir o consumo de combustível e, se isto tiver ocorrido em uma situação de alta no preço do petróleo, conseguir uma redução substancial nas despesas de combustível.

De qualquer forma, como a aquisição de um novo sistema propulsor representa um custo significativo, esta decisão deveria ter sido apoiada em uma análise de viabilidade econômica. Só assim pode-se ter certeza que a redução dos gastos com combustível compensaria o investimento feito com a reforma da instalação propulsora.

No capítulo 1, quando se abordou o problema de projeto da instalação propulsora, definiu-se uma curva de resistência ao avanço para condições médias de casco e mar. Não foi feito nenhum comentário sobre a variação da curva de resistência ao longo da vida do navio, porém, isto pode ocorrer devido à alteração da rugosidade das chapas do casco. A alteração da curva de resistência do casco, devida à mudança da rugosidade das chapas do casco, requer maior empuxo do hélice para manter a velocidade de serviço. O aumento de resistência, aliado a uma eventual deterioração no desempenho do hélice, impõe ao motor uma nova curva de potência requerida.

Como conseqüência deste aumento dos valores da curva de potência requerida, com o novo nível de rugosidade da chapa, é possível que o navio não atinja a velocidade de serviço em condições médias de casco e mar.

O objetivo da análise é desenvolver um procedimento para cálculo dos novos valores de velocidade do navio e potência e rotação do motor para condições de operação diferentes daquelas previstas no projeto

### Item (a)

Para a análise deste item, considere-se o valor do coeficiente de avanço para a prova de mar realizada após a reforma,  $(J_{12})_{PM}$ :

$$(J_{12})_{PM} = V_s (1-w) / ((N_{12})_{PM} D) \quad (5.2)$$

Como todos os termos do 2º membro de (5.2) são conhecidos, o valor de  $(J_{12})_{PM}$  está determinado (Observar que mesmo que se considere alteração do coeficiente de esteira,  $w$ , por efeito do aumento de rugosidade do casco, há meios de se estimar o novo valor. A partir de  $(J_{12})_{PM}$ , pode-se obter no diagrama do hélice o correspondente valor de  $K_T$  para esta condição,

$(K_T)_{12 PM}$ . E a partir de  $(K_T)_{12 PM}$  obtém-se o valor do empuxo do hélice:

$$(T)_{12 PM} = \rho [(N_{12})_{PM}]^2 D^4 (K_T)_{12 PM} \quad (5.3)$$

Conhecendo-se o valor do coeficiente de redução do empuxo,  $t$ , obtém-se o valor da resistência para esta situação:

$$(R_T)_{12 PM} = (T)_{12 PM} (1 - t) \quad (5.4)$$

Portanto, se são conhecidos os valores da resistência para as condições de prova de mar com o navio novo e com 12 anos, tem-se o valor do acréscimo de resistência  $\Delta R_T$ :

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

$$\Delta R_T = (R_T)_{12 \text{ PM}} - (R_T)_{\text{novo PM}} \quad (5.5)$$

e pode-se calcular o valor de  $\alpha_1$  :

$$\alpha_1 = \Delta R_T / [12 (R_T)_{\text{novo PM}}] \quad (5.6)$$

Constata-se, portanto, que é possível determinar o valor do acréscimo de resistência a partir dos resultados de prova de mar do navio, por meio do emprego do diagrama de série sistemática do hélice. Mas este não é um procedimento de fácil entendimento porque ele trabalha com variáveis adimensionais. A discussão do próximo item traz uma nova abordagem para esta questão.

### Item (b)

O problema de projeto da instalação propulsora, envolvendo a integração entre casco hélice e motor, foi tratado considerando a seleção de um hélice de uma dada série sistemática. Para tanto, a integração casco – hélice, referente à igualdade de forças, recorreu ao uso dos coeficientes adimensionais do hélice.

É possível, porém, utilizando os dados do diagrama de série sistemática, obter uma representação do comportamento do hélice em termos de variáveis dimensionais. Isto não só é possível, como será visto neste capítulo, como é conveniente.

Portanto, para responder este item, bem como ao item c, é necessário desenvolver as bases do procedimento. Apresenta-se antes a revisão do procedimento de projeto da instalação propulsora e a formulação das equações do movimento.

### **5.3 Procedimento para Projeto da Instalação Propulsora - Revisão**

Para satisfazer os requisitos de projeto: navio se deslocando na rota prevista com certo deadweight de carga, a uma velocidade  $V_s$  - com o menor consumo de potência, deve-se escolher o hélice ótimo, isto é, aquele que apresenta a máxima eficiência para as condições de serviço, ou seja, velocidade  $V_s$  para deslocamento de projeto, em condições médias de casco e mar.

Para a seleção do hélice pode - se aplicar o seguinte procedimento:

a) Determinação da curva de resistência do navio. Esta curva é obtida a partir da curva levantada com o ensaio de reboque do modelo no tanque de provas, através de extrapolações para diferença na resistência de atrito ( $\Delta C_f$ ) e de apêndices, e de correções para condições médias de casco e mar. Tem-se, dessa forma, o valor da resistência para a velocidade de serviço.

b) Determinação dos coeficientes de esteira ( $w$ ), de redução da força propulsora ( $t$ ) e eficiência relativa rotativa ( $e_{rr}$ ). Estes valores são obtidos pelo ensaio de autopropulsão do modelo empregando- se um hélice de estoque; este hélice deve ter o diâmetro próximo do valor que representa a restrição máxima para o hélice em questão.

c) Cálculo do hélice

Definido um número de pás, que depende principalmente do problema de vibrações, e fixado o diâmetro igual ao máximo permissível (pois isto resulta em maior eficiência), resta agora determinar a razão de área expandida e a razão passo – diâmetro que conduzem ao hélice de eficiência ótima que satisfaça também o requisito de cavitação. O processo de cálculo fornece não somente os valores das razões de área expandida e passo diâmetro, mas também a eficiência máxima e a rotação de projeto do hélice ótimo.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

É necessário, então, verificar se existe um motor Diesel que forneça a potência requerida para o navio na rotação requerida pelo hélice ótimo.

Observar que a potência requerida do motor já é conhecida, pois estão determinados os valores da potência de reboque, da eficiência do casco ( $e_n$ ), da eficiência do propulsor ( $\eta_{p0}$ ), da eficiência relativa rotativa,  $e_{rr}$ , e pode-se estimar um valor da eficiência de transmissão  $e_t$ . Caso se encontre um motor que satisfaça esta exigência, o problema está quase encerrado. Falta apenas a verificação de cavitação; se o hélice não apresentar fenômeno de cavitação o sistema propulsor do navio está definido. No entanto, se houver este problema deve-se, então, escolher o hélice mais eficiente que não apresenta cavitação.

Se, porém, não se dispõe de um motor que satisfaça as exigências de potência e rotação precisa-se optar por outro caminho. É fixada a rotação do hélice em função das características do motor e passa-se a otimização do diâmetro.

É claro que tudo que se disse a respeito da escolha do motor se refere ao caso de instalação diesel direta; no caso de instalação diesel com redução sempre se pode especificar um redutor que concilie a rotação do motor com a rotação de projeto do hélice.

Pode-se perceber que para o cálculo do hélice precisa-se jogar com características do navio e do motor. O ponto de funcionamento do conjunto propulsor (motor-hélice) para satisfazer os requisitos de velocidade do navio, é fixado assim por uma conjugação das características destes três elementos: casco, hélice e motor (motor mais redutor).

Determinou-se, por enquanto, apenas um ponto de funcionamento do conjunto; isto foi feito fixando-se determinadas para casco e mar e uma dada curva de operação (injeção de combustível) do motor. No entanto, nem sempre o navio encontrará estas condições; ao longo de um período entre docagens o casco passa por diversos estágios de incrustações e alteração de rugosidade, que aumentam a resistência do navio; o mar pode se apresentar mais calmo ou mais violento, de acordo com a estação do ano; o navio pode viajar com deslocamento parcial, etc. Enfim, precisa-se entender que o sistema propulsor do navio foi projetado para condições médias de casco e mar, e estas condições médias, por isto mesmo, não são constantes. Para se determinar os diversos pontos possíveis de funcionamento do sistema é necessário definir uma diretriz de operação: por exemplo, a velocidade de serviço do navio, sempre que possível, deve ser mantida, independentemente da variação das condições de casco, mar e deslocamento.

Ou por outro lado, é interessante, desde que possível, que se mantenha o motor trabalhando sempre com a mesma carga (mesma pressão média efetiva), ou, então menor consumo específico de combustível.

### 5.4 Equações do Movimento

O procedimento de projeto do sistema propulsor do navio consiste essencialmente em se determinar a solução das equações de movimento para uma particular condição de operação.

São duas as equações do movimento para o sistema considerado:

- a) integração casco- hélice:

$$F = M \, dV / dt \quad (5.7)$$

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

onde:

$m$  é a massa total do sistema, isto é:

$$m = \Delta/g + m_{\text{adic.}} \quad (5.8)$$

em que  $\Delta$  é o deslocamento do navio,  $g$  a aceleração da gravidade e  $m_{\text{adic.}}$  é a massa adicionada ou massa hidrodinâmica relativa ao movimento de avanço; durante a aceleração do navio uma parcela de energia é utilizada para acelerar uma quantidade de água (massa hidrodinâmica) que se desloca com o navio. Para navios de formas convencionais a massa hidrodinâmica é cerca de 7 a 10% da massa do navio.

$dV/dt$  é a aceleração do navio em movimento de avanço;

$V$  é a velocidade do navio;

$F$  é a resultante das forças que atuam sobre o casco.

A força  $F$  é dada por:

$$F = T - \bar{R}_T \quad (5.9)$$

em que:

$T$  é o empuxo gerado pelo hélice;

$\bar{R}_T$  é a resistência aumentada (devido à operação do hélice) ao avanço.

$$\bar{R}_T = R_T [1 / (1-t)] \quad (5.10)$$

$R_T$  é a resistência ao avanço;

$[1/(1-t)]$  é o coeficiente de aumento da resistência ( $t$  é conhecido tradicionalmente como coeficiente de redução do empuxo).

b) - integração motor -hélice

$$M = J d\Omega / dt \quad (5.11)$$

onde:

$\Omega$  é a velocidade angular do eixo propulsor ( $\Omega = 2\pi N$ );

$M$  é a resultante dos conjugados que atuam sobre o eixo;

$$M = Q_m - Q_p - Q_{\text{at.}} \quad (5.12)$$

em que:

$Q_m$  é o conjugado (torque) fornecido pelo motor;

$Q_p$  é o conjugado absorvido pelo propulsor;

$Q_{\text{at.}}$  é o conjugado perdido em atrito nos mancais;

$J$  é o momento de inércia total do sistema propulsor;

$$J = J_m + J_e + J_p + J_{\text{hid}} \quad (5.13)$$

$J_m$  é o momento de inércia do motor (partes móveis);

$J_e$  é o momento de inércia do eixo;

$J_p$  é o momento de inércia do propulsor;

$J_{\text{hidr}}$  é o momento de inércia da massa hidrodinâmica associada ao propulsor.

Para hélices usuais  $J_{\text{hidr}} = 0,25 J_p$

As equações (5.7) e (5.11) constituem as equações do movimento do sistema. A resolução simultânea destas equações permite determinar a resposta do sistema - velocidade do navio e rotação do eixo para condições especificadas de operação. Em realidade, a solução dessas equações requer que se determinem funções explícitas de cada um dos termos de (5.9) e (5.12) em

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

função das variáveis de estado - velocidade do navio ( $V$ ), e velocidade angular do eixo ( $\Omega$ ).

A explicitação destas funções faz parte da modelagem do sistema. Para determinar estas funções são realizados ensaios experimentais com os componentes do sistema - casco, hélice e motor. Embora seja difícil explicitar essas funções, é fácil mostrar que:

$$R_T = R_T(\Delta, \text{ condições de casco e mar, } V) \quad (5.14)$$

isto é, a resistência de um dado navio depende do deslocamento, de condições de casco e mar (c.c.m.) e da velocidade).

$$T = T(V_a, N) \quad (5.15)$$

O empuxo de um dado hélice (de passo fixo) depende da velocidade de avanço e da rotação do hélice.

$$Q_p = Q_p(V_a, N) \quad (5.16)$$

O conjugado do propulsor depende da velocidade de avanço e da rotação do hélice.

$$Q_m = Q_m(N, m_{\text{comb}}) \quad (5.17)$$

O torque do motor depende da massa de combustível injetada por ciclo e da rotação do motor.

O conhecimento explícito das funções acima, e sua substituição em (5.7) e (5.11), permite obter a resposta do sistema para condições especificadas, seja em regime permanente, seja em regime transitório. Embora a análise do comportamento transitório do sistema tenha interesse no estudo de manobrabilidade, para os objetivos deste curso o tratamento do problema de regime permanente é o que apresenta maior importância. Assim, será examinado o caso particular em que as equações (5.7) e (5.11) se reduzem a:

$$F = T - R_T = 0$$

ou:

$$T(V_a, N) (1-t) = R_T(\Delta, \text{ c.c.m, } V) \quad (5.18)$$

e

$$M = Q_m - Q_p - Q_{at} = 0$$

ou:

$$Q_m(N, m_{\text{comb}}) = Q_p(V_a, N) + Q_{at} \quad (5.19)$$

As equações (5.7) e (5.11) podem ser resolvidas numericamente, desde que suas funções sejam explicitadas numericamente. Entretanto, vai se recorrer a um procedimento gráfico para solução dessas equações. Este procedimento tem a vantagem de dar uma visão bem completa do problema de integração.

### 5. 5 Curvas Características

O procedimento, que é 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, quando se fez uso de curvas adimensionais do hélice extraídas dos diagramas de séries sistemáticas e adimensionalizou-se a resistência do casco, efetua-se agora a dimensionalização das curvas do hélice para determinar as soluções da equação (5.7). Para obtenção das soluções da equação (5.11), que efetua a

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

integração entre demanda de potência do conjunto casco hélice e a potência fornecida pelo motor, será efetuada a dimensionalização da curva de constante de torque do hélice.

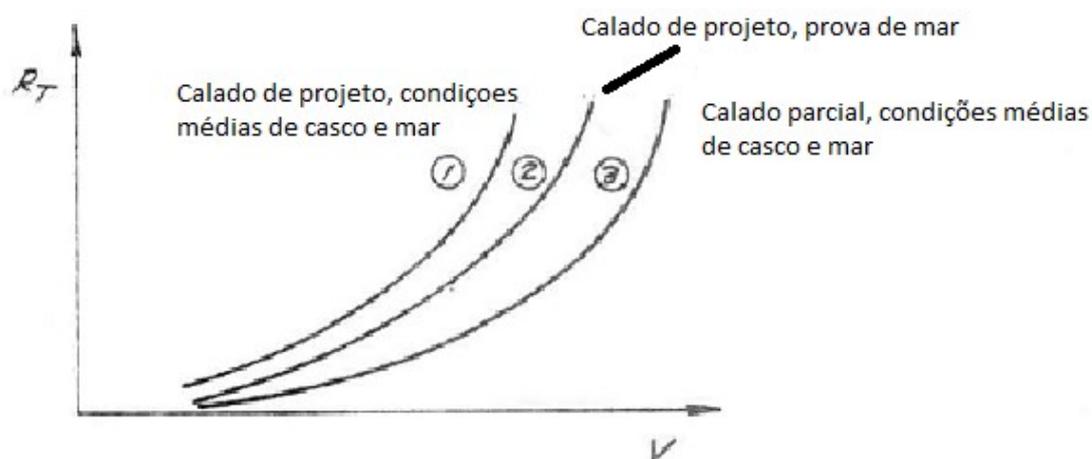
São apresentadas, a seguir, as curvas características dos três elementos: casco, hélice e motor.

### a) Curvas Características do Casco.

As curvas características do casco são as curvas de resistência ao avanço em função da velocidade. Assim, é necessário conhecer a curva de resistência para calado de projeto e condições médias de casco e mar. Além disto, é necessário ter uma estimativa da variação do coeficiente de resistência total,  $c_T$ , em função de mudanças do estado de limpeza do casco (de sua rugosidade) e de alterações das condições do mar. Outra característica necessária é a relação entre a resistência de reboque do navio para condição de deslocamentos parciais e a resistência para calado de projeto. Sem o conhecimento destes elementos fica muito difícil prever o ponto de operação do sistema propulsor, e muitas vezes se atribui a falhas do motor ou do hélice a impossibilidade de se obter uma desejada condição de operação.

Portanto, é importante dispor destas características do casco. A Figura 5.1 mostra a curva de resistência do navio para condições de projeto, além de curvas para outras condições.

Na Figura 5.1 estão representadas as curvas de resistência de projeto (deslocamento de projeto e condições médias de casco e mar), de prova de mar (deslocamento de projeto e casco limpo e mar calmo) e de operação com deslocamento parcial (em condições médias de casco e mar). Podia ser interessante representar também a curva de resistência de calado parcial para a prova de mar, pois muitas vezes realiza-se a prova de mar de um navio com deslocamento parcial.



**Figura 5. 1 Curvas características do casco**

Para a obtenção destas curvas, é necessário que se disponha de funções do tipo:

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

$$c_T = f_1 (\text{limpeza do casco, condição de mar}) \Delta = \text{cte} \quad (5.20)$$

$$(R_T)_{\Delta \text{parcial}} = f_2 (R_T, \Delta, \Delta_{\text{parc}}) \quad (5.21)$$

onde  $c_T$  é o coeficiente de resistência total.

### b) Curvas Características do Hélice

As curvas características de um hélice são, usualmente, apresentadas na forma de parâmetros adimensionais. Um grupo de adimensionais normalmente utilizados é constituído por  $K_T$ ,  $K_Q$ ,  $J$ , como mostrado na Figura 5.2, para o hélice selecionado para a instalação propulsora (número de pás, razão de área expandida e razão passo diâmetro)

Os adimensionais que aparecem na Figura 5.2, como já visto anteriormente, têm as seguintes expressões:

$$K_T = T / \rho N^2 D^4$$

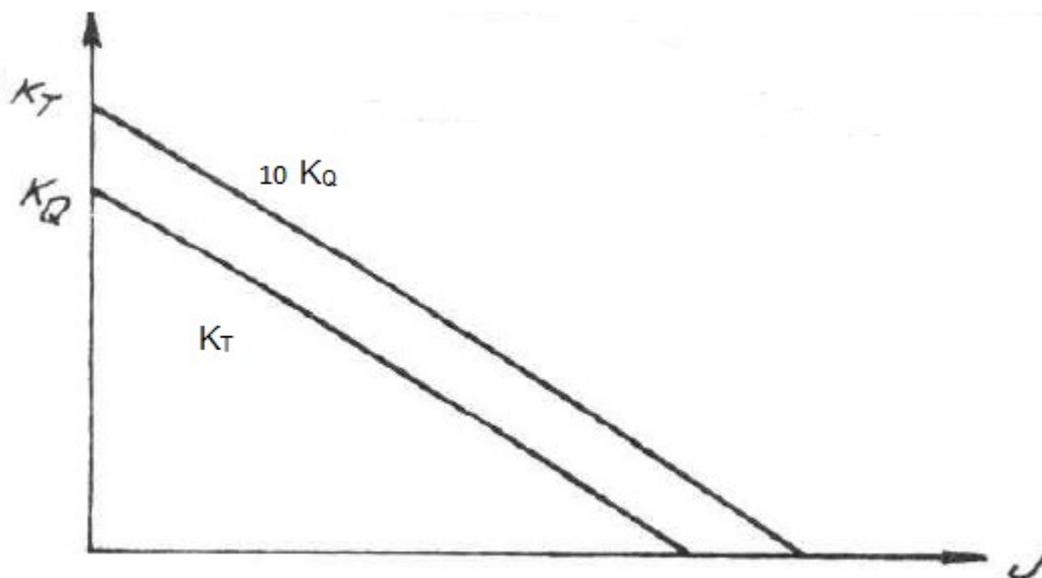
$$K_Q = Q / \rho N^2 D^5$$

$$J = V_a / N D$$

onde:

$\rho$  é a densidade da água;

$D$  é o diâmetro do propulsor.



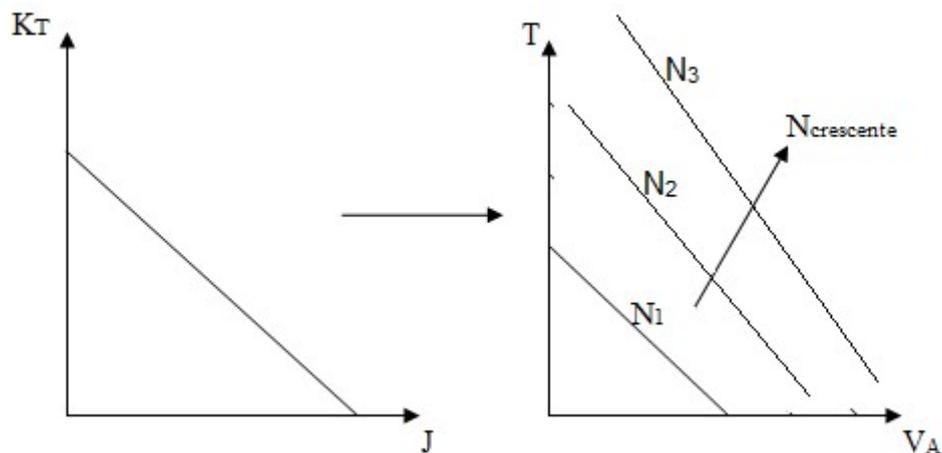
**Figura 5.2** Curvas características do hélice selecionado.

Como mencionado anteriormente, a Figura 5.2 mostra as curvas características para um hélice de passo fixo. Em caso de se trabalhar com hélice de passo controlável precisa-se usar as curvas de  $K_T$  e  $K_Q$  para cada valor possível do passo (ou da relação passo-diâmetro).

As curvas características do hélice em sua forma adimensional não são convenientes para o propósito deste estudo. Uma vez que o objetivo deste capítulo é efetuar a integração de um conjunto motor- hélice- casco conhecido,

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

é interessante que os elementos envolvidos sejam representados por curvas que possam ser colocadas, se possível, em um mesmo gráfico. Em realidade, como a integração se processa em duas etapas: casco-hélice (equação 5.18), e hélice-motor (equação 5.19) - é necessário que se utilizem dois gráficos diferentes. No que diz respeito à integração casco hélice, verificou-se que o casco é representado pela curva de resistência em função da velocidade. Desta forma, é razoável que se procure empregar curvas características do hélice na forma de empuxo em função da velocidade. Para a determinação destas curvas pode-se partir da curva da constante de empuxo em função do coeficiente de avanço, mostrada na Figura 5.2. O procedimento para consecução deste objetivo, que é representado pela Figura 5.3, é esquematizado a seguir. A Figura 5.3 apresenta dois gráficos. O primeiro constitui parte da Figura 5.2 com a curva de  $K_T$  vs  $J$ . O outro gráfico apresenta curvas do empuxo do hélice  $T$  em função da velocidade de avanço,  $V_a$  parametrizadas em  $N$ , rotação do hélice.



**Figura 5.3 Modificação da curva característica de empuxo do hélice**

A passagem de um gráfico para outro não apresenta nenhuma dificuldade. É mostrada, a seguir, a determinação de uma curva  $T = f(V_a)_{N=cte}$  para ilustrar o processo e também para justificar a disposição e o formato destas curvas. Assim, fixa-se uma rotação de trabalho,  $N_1$ . Na curva  $K_T(J)$  do hélice, a cada ponto corresponde um par de valores da constante de empuxo  $K_T$  e do coeficiente de avanço,  $J$ . Porém, como já estão fixados os valores do diâmetro do hélice e da rotação,  $N$ , e da densidade do fluido, pode-se obter, em correspondência, os valores do empuxo,  $T$ , e da velocidade de avanço,  $V_a$ . Assim, a função  $T = f(V_a)_{N=cte}$  tem o mesmo aspecto da função  $K_T = K_T(J)$  e se aproxima bastante de uma reta. Com três pontos é possível plotar uma curva razoável que represente a função.

Apenas para efeito de justificação, pode-se supor que  $K_T(J)$  seja dada por uma reta:

$$K_T(J) = (K_T)_0 - b J \quad (5.22)$$

em que:

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

$$K_T = T / \rho N^2 D^4 = T / C_1 (N) \quad (5.23)$$

$$J = V_a / N D = V_a / C_2 (N) D \quad (5.24)$$

onde:

$(K_T)_0$  é o valor de  $K_T$  para  $J = 0$ ;

$b$  é o coeficiente angular da (suposta) reta  $K_T(J)$ ;

$C_1(N)$  e  $C_2(N)$ , para um dado hélice são funções exclusivas da rotação:

$$C_1 (N) = \rho N^2 D^4 \quad (5.25)$$

$$C_2 (N) = N D \quad (5.26)$$

Se for fixado o valor da rotação,  $N = N_1$ , então  $C_1(N_1)$  e  $C_2(N_2)$  são constantes. Pode-se, portanto, expressar a seguinte relação:

$$T = C_1 (N) K_T = C_1 (N) [(K_T)_0 - b V_a / C_2 (N) D] \quad (5.27)$$

Em particular, para  $N = N_1$  tem-se:

$$T = T_0(N_1) - b'(N_1) V_a \quad (5.28)$$

o n d e :

$$T_0(N_1) = C_1(N_1) (K_T)_0 \quad (5.29)$$

$$b'(N_1) = C_1 (N_1) b / C_2 (N_1) \quad (5.30)$$

Repetindo-se o processo para outros valores da rotação, podem-se transportar para o novo gráfico todas as informações contidas no diagrama  $K_T = K_T(J)$ .

Falta apenas um esclarecimento quanto à posição relativa entre as diversas curvas  $T = T(V_a)_{N=cte}$ . Isto é, deseja-se saber para uma dada modificação, aumento da rotação, por exemplo, se as curvas se afastam ou se aproximam da origem. Com este objetivo, considerem-se dois valores de rotação,  $N_1$  e  $N_2$ , sendo  $N_2=2N_1$

A conclusão que se vai obter é mais ou menos intuitiva, mas é preferível estabelecê-la analiticamente através de uma prova matemática. Para as rotações consideradas,  $N_1$  e  $N_2$ , resultam:

$$T_0(N_1) = C_1(N_1) (K_T)_0 = \rho N_1^2 D^4 (K_T)_0$$

$$b'(N_1) = C_1 (N_1) b / C_2 (N_1) = \rho N_1 D^3 b$$

$$T_0(N_2) = C_1(N_2) (K_T)_0 = 4 \rho N_1^2 D^4 (K_T)_0$$

$$b'(N_2) = C_1 (N_2) b / C_2 (N_2) = 2 \rho N_1 D^3 b$$

Desta forma, resulta:

$$T_0(N_2) = 4 T_0 (N_1)$$

$$b'(N_2) = 2 b'(N_1)$$

Portanto, para um aumento da rotação, as curvas (lineares) de empuxo em função da rotação se afastam da origem. É interessante observar que as retas apresentam coeficientes angulares diferentes, além de valores iniciais (para  $V_a = 0$ ) diferentes. Pode-se, portanto, afirmar que as curvas de  $T \times V_a$  se afastam da origem à medida que aumenta a rotação  $N$ . Como mencionado anteriormente, a conclusão é intuitiva ou física: para uma dada velocidade de

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

avanço quanto maior a rotação do hélice maior é o empuxo que ele pode fornecer, uma vez que ele está absorvendo maior potência.

Em uma forma mais concisa, a partir da curva (ou do polinômio) da constante de empuxo,  $K_T$ , em função do coeficiente de avanço,  $J$ , podem-se determinar as curvas, parametrizadas em rotação, de empuxo do hélice em função da velocidade de avanço, ou seja:  $T = f'(V_A)_{N=cte}$ , como mostrada na Figura 5.3.

Pode-se generalizar o procedimento para uma função qualquer  $K_T(J)$ . Considere-se a função  $K_T = f(J)$ ; pode-se escrever:

$$\frac{T}{\rho N^2 D^4} = f\left(\frac{V_a}{ND}\right) \quad (5.31)$$

ou

$$T = \rho N^2 D^4 f\left(\frac{V_a}{ND}\right) \quad (5.32)$$

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

$$T = f'(V_a)_{N=cte} \quad (5.33)$$

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 o será, como visto acima.

Um procedimento semelhante ao descrito acima será utilizado para uma representação mais conveniente das características do torque do hélice. A figura 5.4 mostra a modificação que será efetuada na curva  $K_Q(J)$  do hélice, para efeito de integração com o motor. O primeiro gráfico da Figura 5.4 contém a curva  $K_Q = K_Q(J)$ . Em última análise, fixado um valor da rotação,  $N$ , esta função exprime uma relação entre o conjugado,  $Q$ , que o hélice deve absorver para uma dada velocidade de avanço,  $V_a$ .

Porém, para o presente objetivo é mais interessante introduzir uma função que represente, em vez do conjugado, a potência absorvida,  $P_A$ . Logo, efetuando-se a multiplicação do conjugado pela velocidade angular obtém-se a potência entregue ao hélice:

$$P_A = Q \Omega$$

ou ainda:

$$P_A = 2 \pi Q N \quad (5.34)$$

O método de conversão de um gráfico para outro é análogo ao descrito anteriormente para o empuxo. Pode-se provar que o aspecto das curvas

$P_A = P_A(V_a)_{N=cte}$  é muito semelhante ao das curvas de empuxo. Assim, resumindo o processo, fixada a rotação, um ponto no gráfico  $K_Q(J)$  corresponde a uma dada velocidade de avanço,  $V_a$ , e a um certo conjugado  $Q$ , que multiplicado por  $2 \pi$  vezes a rotação  $N$  dá a potência absorvida pelo hélice,  $P_A$ . Analogamente ao que foi feito com a curva de empuxo, pode-se admitir uma relação linear para a curva característica de conjugado:

$$K_Q(J) = (K_Q)_0 - d J \quad (5.35)$$

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

em que:

$$K_Q = Q / \rho N^2 D^5 = Q / C_3(N) \quad (5.36)$$

$$J = V_a / N D = V_a / C_2(N) D \quad (5.37)$$

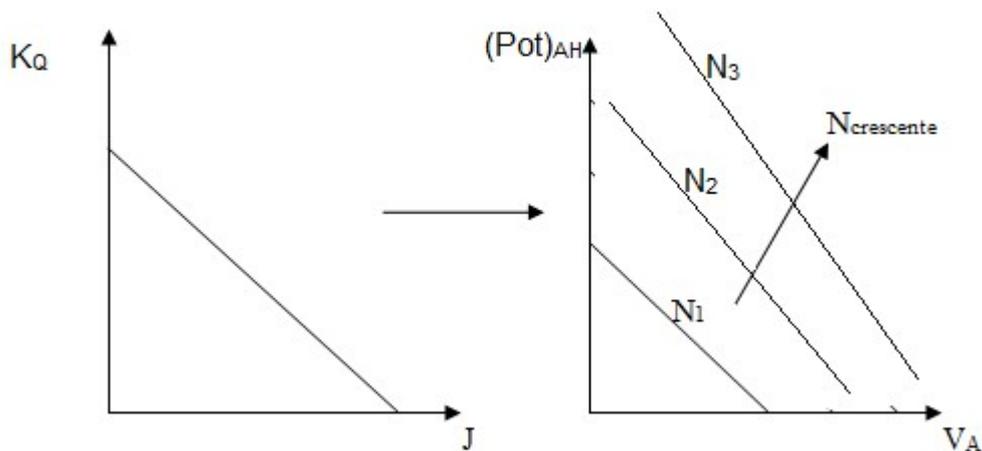
onde:

$(K_Q)_0$  é o valor de  $(K_Q)$  para  $J = 0$ ;

$d$  é o coeficiente angular da (suposta) reta  $K_Q(J)$ ;

$C_3(N)$  e  $C_2(N)$ , para um dado hélice, são funções exclusivas da rotação:

$$C_3(N) = \rho N^2 D^5 \quad (5.38)$$



**Figura 5.4 Modificação da curva característica de torque do hélice**

Se for fixado o valor da rotação,  $N = N_1$ , então  $C_3(N_1)$  e  $C_2(N_1)$  são constantes. Pode-se, portanto, expressar a seguinte relação:

$$Q = C_3(N) K_Q = C_3(N) [(K_Q)_0 - d V_a / C_2(N) D] \quad (5.39)$$

ou

$$P_A = C_4(N) [(K_Q)_0 - d V_a / C_2(N) D] \quad (5.40)$$

onde:

$$C_4(N) = 2\pi \rho N^3 D^5$$

Em particular, para  $N = N_1$  tem-se:

$$P_A = P_{A0}(N_1) - d'(N_1)V_a \quad (5.41)$$

onde:

$$P_{A0}(N_1) = C_4(N_1) (K_Q)_0 = 2\pi \rho N_1^3 D^5 (K_Q)_0 \quad (5.42)$$

$$d'(N_1) = C_4(N_1) d / C_2(N_1) = 2\pi \rho d N_1^2 D^5 \quad (5.43)$$

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

É possível mostrar, como foi feito para as curvas de empuxo, que as curvas de potência do hélice  $P_A$  se afastam da origem à medida que se aumenta a rotação.

Em uma forma mais concisa, a partir da curva (ou do polinômio) da constante de torque,  $K_Q$ , em função do coeficiente de avanço,  $J$ , podem-se determinar as curvas, parametrizadas em rotação, de potência absorvida pelo hélice, ou seja, a função  $P_A = P_A(Va)_{N=cte}$  tem o mesmo aspecto da função  $K_Q = g(J)$ .

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

$$\frac{Q}{\rho N^2 D^5} = g\left(\frac{Va}{ND}\right) \quad (5.44)$$

ou

$$Q = (\rho N^2 D^5) g\left(\frac{Va}{ND}\right) \quad (5.45)$$

$$P_D = (2\pi\rho N^3 D^5) g\left(\frac{Va}{ND}\right) \quad (5.46)$$

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

$$P_D = g'(Va)_{N=cte} \quad (5.47)$$

### c) Curvas Características do Motor

Para o motor, normalmente, se dispõe das curvas de potência em função da rotação para diversos regimes de carga, ou seja, para diferentes posições do controle das bombas injetoras. Pode-se também especificar para um motor curvas de potencia para valores constantes de pressão média efetiva no freio. De uma forma geral, tem mais interesse definir qual é a região possível para operação contínua do motor. A Figura 5.5 mostra região de operação do motor em um gráfico de potência versus rotação. Estão mostradas na figura as limitações impostas por diversos fatores, como descritas a seguir. O trecho do polígono AB indica a limitação de rotação máxima, relacionada com a velocidade média do pistão de projeto para um dado motor. A curva BC representa a limitação de mínima pressão média efetiva no freio, associada à dificuldade de combustão de mistura ar - combustível muito pobre. O segmento CD representa a limitação de mínima rotação do motor, que está associada a problemas de manutenção de rotação constante. O trecho DE indica os limites de potência relacionados com deficiência no funcionamento do turbo compressor em baixa carga. O segmento EF constitui a limitação de pressão média efetiva no freio máxima, que também é um parâmetro de projeto do motor. E, finalmente, o trecho FA indica a limitação máxima de potência para operação contínua e segura do motor. Está também incluída no gráfico a curva de potência média efetiva no freio para condição de projeto.

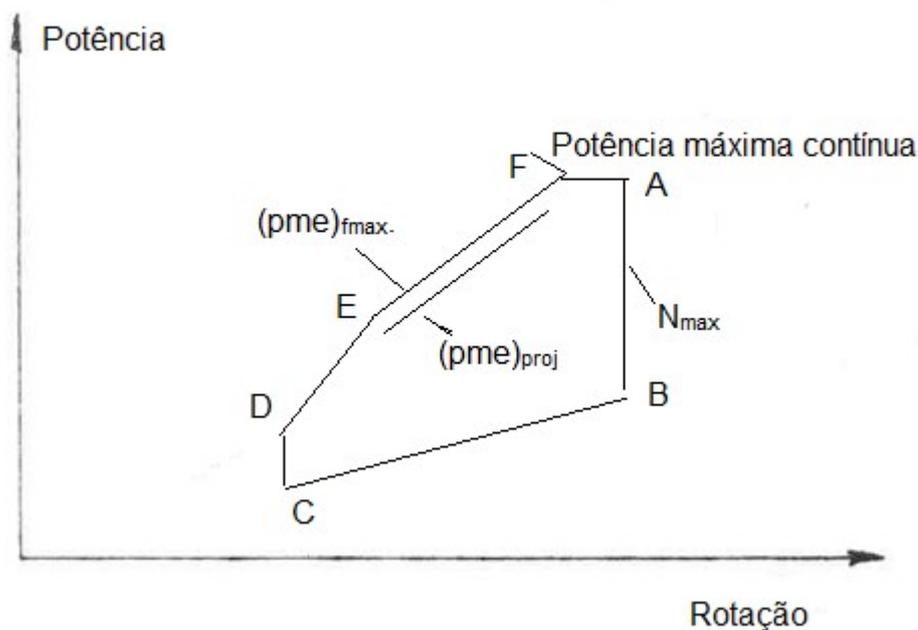


Figura 5.5 - Região de operação do motor

### 5.6 - Integração Casco - Hélice - Motor

As curvas características, ou região de operação, dos três elementos foram apresentadas. É preciso formular agora um procedimento para efetuar a integração destas curvas. Antes de expor o método adotado, serão efetuadas algumas considerações gerais sobre o problema de integração.

Existem diversos procedimentos, alguns mais trabalhosos outros menos, que conduzem à resolução de um particular problema. Nem todos eles, porém, são gerais, e isto tira um pouco de sua utilidade. O procedimento adotado tem o grande mérito de ser geral, podendo ser empregado para os mais diversos problemas de desempenho do sistema propulsor.

#### 5.6.1 Análise Preliminar

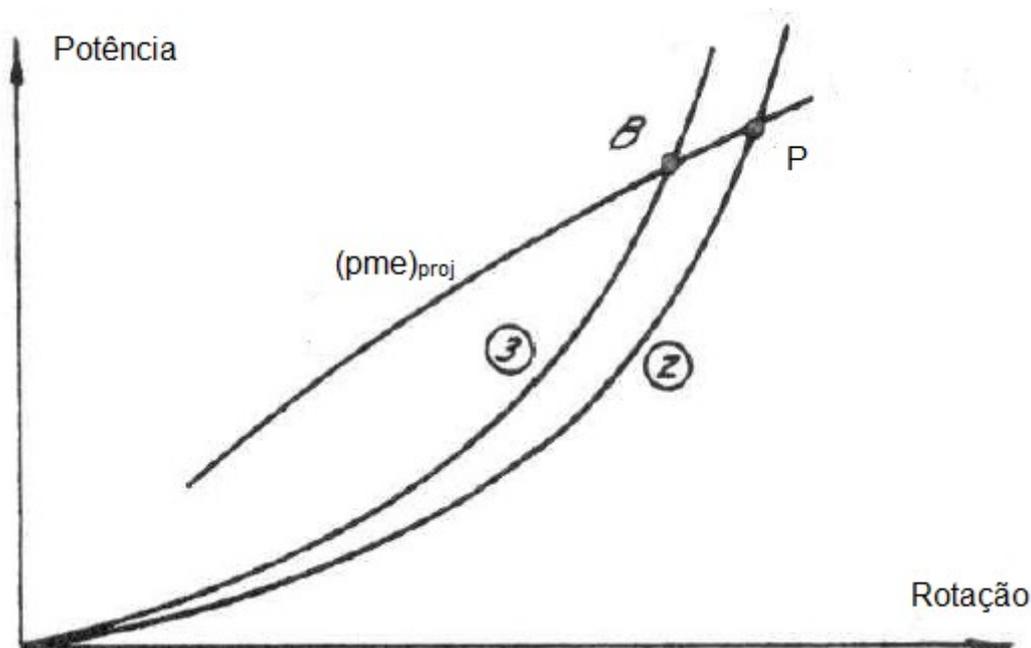
Efetuando-se a primeira etapa da integração, entre casco e hélice, pode-se chegar a um resultado bastante interessante e que bem útil para visualizar o desempenho do sistema propulsor. Admita-se que, como resultado desta primeira integração, obtenha-se a curva de potência requerida pelo conjunto casco-hélice em função da rotação do hélice. Não é difícil obter este resultado e, em seguida, será exposto este procedimento. É claro que esta curva é válida para uma determinada condição de deslocamento, limpeza de casco e estado de mar. Agora, se for feita a representação da curva potência x rotação para o conjunto casco - hélice sobre o diagrama de potência do motor tem-se como resultado o gráfico da Figura 5.6.

Neste gráfico, é mostrada a curva de potência de serviço contínuo -  $(pme)_{proj}$  do motor. A curva 2 representa a potência requerida pelo conjunto casco-hélice para deslocamento de projeto e condições médias de casco e mar. O ponto P, intersecção das duas curvas é, em consequência, o ponto de funcionamento do sistema, e obviamente o ponto de projeto do sistema propulsor que assegura

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

que o navio se desloque a uma velocidade  $V_s$  com o menor consumo de potência.

Se não houver nenhuma modificação das condições de operação que provoquem uma alteração da curva casco-hélice, e não se atuar sobre o controle das bombas injetoras do motor, de modo que o motor continue trabalhando na curva de serviço contínuo, então, o ponto de operação será sempre P. Admita-se, porém, que houve uma repentina mudança nas condições do mar, aumento de resistência, de modo que a curva de potência do conjunto casco hélice passou de (2) para (3). Mantendo-se o motor operando na curva de serviço contínuo, o ponto de operação do sistema passa a ser B, em que o motor fornece uma potência menor a uma rotação mais baixa. Apenas com este gráfico não se pode saber qual a velocidade do navio, embora seja evidente que ela será menor que a velocidade de projeto,  $V_s$ .



**Figura 5.6** Curvas de potência requerida e potência fornecida

Mesmo que o motor seja colocado para funcionar na curva de pressão média efetiva no freio máxima não se poderia garantir que a velocidade de serviço seja atingida. Para determinar a velocidade do navio correspondente ao ponto de operação B seria preciso inverter o processo utilizado para obtenção da curva de potência do conjunto casco-hélice com o objetivo de determinar, então, na curva de resistência do navio o ponto de operação. É intuitivo, neste caso, que a velocidade do navio diminui quando o ponto de operação passa de P para B, pois houve uma redução na potência fornecida pelo motor, ao mesmo tempo em que houve acréscimo da resistência ao avanço do navio.

Assim, a análise do gráfico da Figura 5.6 serve para ilustrar certas variações nas condições de operação do sistema, mas ele sozinho não é suficiente para fornecer todos os resultados. Além disso, nada foi explicado sobre o processo de obtenção da curva de potencia do conjunto casco-hélice. Necessita-se de um método de ataque do problema que apresente maiores recursos,

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

possibilitando, assim, a determinação de todos os resultados necessários. Apesar das limitações apontadas para utilização do gráfico da Figura 5.6 na análise de desempenho do sistema propulsor, este processo tem sua utilidade, principalmente para sistemas com hélice de passo controlável. Neste caso, o emprego do procedimento básico não é muito apropriado.

### 5.6 2 Procedimento Básico

O procedimento adotado para efetuar a integração casco-hélice-motor compõe-se de duas etapas. Como passo inicial deste processo efetua-se a integração casco-hélice. Uma vez representadas as características do hélice em termos dimensionais, pode-se efetuar a integração casco hélice para condições de regime permanente. Para tanto são representadas, em um gráfico de força versus velocidade, Figura 5.7, as curvas de empuxo líquido do hélice,  $T^*$ , ( $T^*I = T(1-t)$ ) e resistência do casco. É evidente que isto só pode ser feito mediante o emprego de escalas convenientes, e isto exige o conhecimento de valores para o coeficiente de esteira  $w$  e para o fator de redução da força propulsora  $t$ . Normalmente, estes valores são conhecidos para a velocidade de projeto. No presente caso é necessário o conhecimento dos referidos coeficientes para toda a faixa de velocidade do navio. Em caso de não se dispor desses valores pode-se admitir que os coeficientes sejam constantes com a variação de velocidade. Assim, é possível construir o gráfico da Figura 5.7

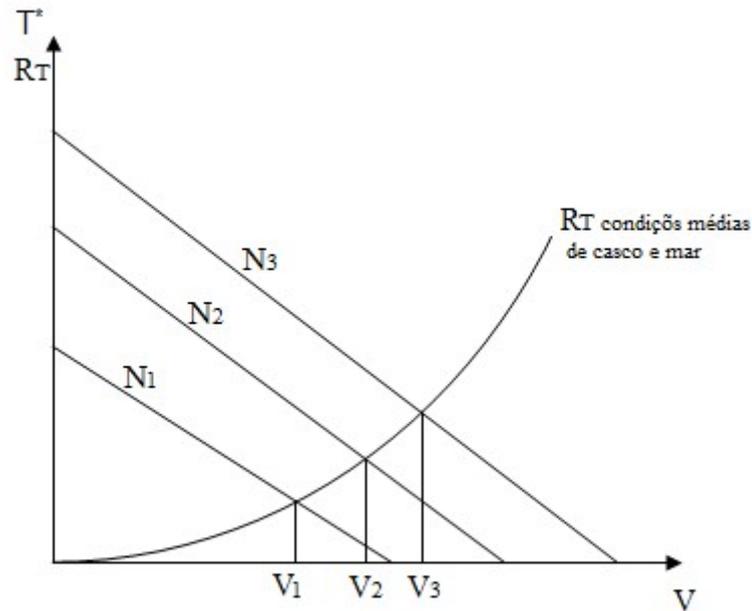
A Figura 5.7 mostra que só existe uma rotação do hélice que assegura que o navio se desloque a uma determinada velocidade. Assim, para que o navio apresente uma velocidade  $V_1$  é preciso que o hélice esteja girando a uma rotação  $N_1$ , pois nesta condição o empuxo do hélice, já corrigido pelo coeficiente de redução, iguala a resistência de reboque do casco. É evidente que para obter esta velocidade desejada é necessário que o motor forneça 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 5.8, as informações obtidas nessa integração. Neste caso, como mencionado anteriormente, efetua-se uma alteração de escala, colocando a potência requerida em função da velocidade do navio.

Do gráfico anterior já se conhece a correspondência entre os valores de velocidade do navio e de rotação do hélice. Transportando, então, aqueles pontos para este gráfico, obtém-se, como resultado, a curva de potência requerida em função da velocidade do navio. Além disto, determina-se a que rotação deve ser fornecida esta potência. Este gráfico é bastante expressivo para ilustrar a interrelação entre velocidade do navio, rotação do hélice e potência requerida.

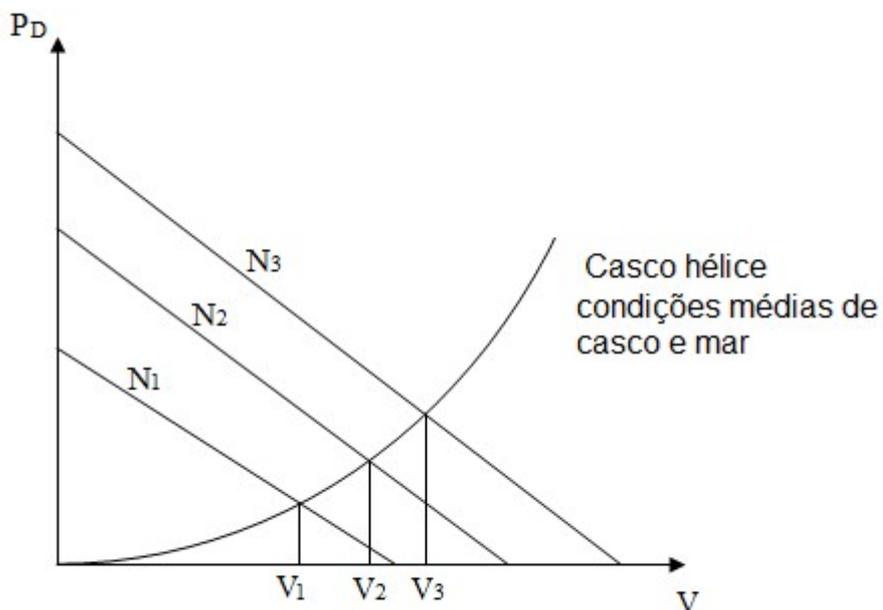
Pode-se, agora, entender a determinação da curva de potência contra rotação para o conjunto casco-hélice, que foi utilizado, anteriormente, na Figura 5.6

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS



**Figura 5.7– Integração casco-hélice**

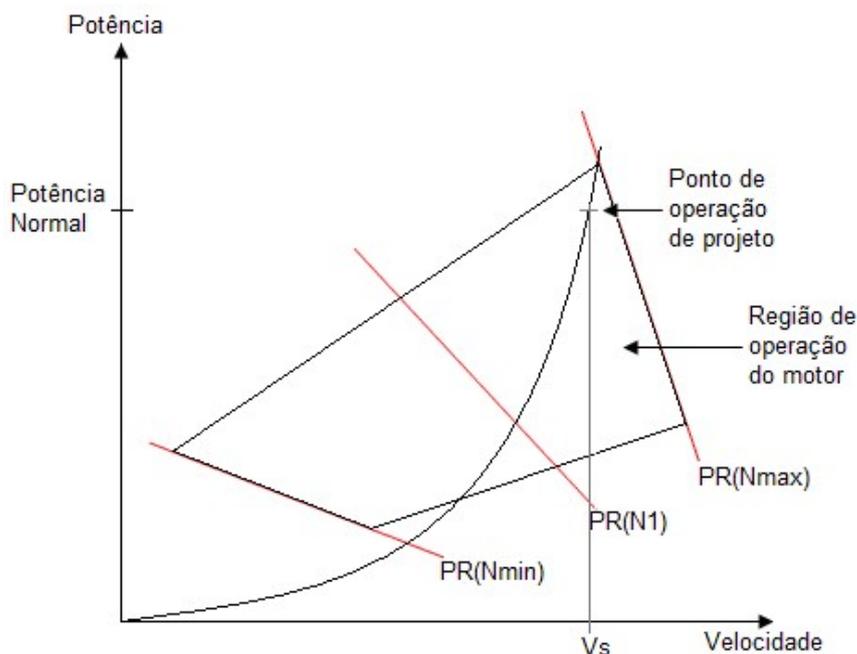
para uma discussão inicial do problema. O emprego conjunto dos gráficos das Figuras 5.7, 5.8 e 5.6, na ordem mencionada, permite, portanto, efetuar uma integração entre os 3 elementos envolvidos no problema, possibilitando, assim, uma análise completa dos resultados provenientes de alterações das características dos referidos elementos. Estes gráficos, no entanto, serão condensados, de acordo com o que mostra a Figura 5.9. Nesta figura estão representadas as características do casco, hélice e motor. Com o emprego deste gráfico pode-se prever praticamente qualquer condição de operação do sistema.



**Figura 5.8 – Curva de potência requerida para o conjunto casco-hélice**

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

Para fazer a integração do conjunto casco - hélice com motor é incluída na Figura 5.9 a região de operação do motor. Foi adotada uma simplificação do diagrama de carga (load diagram) especificado pelos fabricantes, fixando-se curvas para valores máximos e mínimos de rotação e de pressão média efetiva no freio.



**Figura 5.9– Integração casco-hélice-motor (PR é potência requerida)**

Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.9 serão condensados, de acordo com o que mostra a Figura 5.10. Nesta figura estão representadas as características do casco, hélice e motor em dois gráficos conjugados, um de forças e outro de potência. No gráfico de força, estão apresentadas a curva de resistência do casco para deslocamento de projeto e condições médias de casco e mar, curva 1, bem como as curvas de empuxo líquido do hélice,  $T^*$ , para diferentes rotações,  $N_1, N_2, N_3$ .

Com o emprego deste gráfico pode-se prever praticamente qualquer condição de operação do sistema.

### 5.6.3 Análise do desempenho do sistema propulsor

O ponto A da Figura 5.10, intersecção entre a curva de potência requerida para condições médias de casco e mar (curva 2) e a curva de potencia fornecida pelo motor para condição de serviço contínuo (curva 3), representa o ponto de projeto do sistema propulsor, correspondendo a ele, portanto, a velocidade de serviço do navio,  $V_s$ . É possível, agora, efetuar a mesma análise realizada quando da apresentação da Figura 5.6. Assim, admitindo-se que o navio venha operar em outra condição de mar e casco – condição crítica – tem-se outra curva de resistência e, em correspondência, outra curva de potência requerida. Para ilustrar este caso foi construída a Figura 5.11, com os mesmos gráficos da Figura 5.10, porém, com uma diversidade de curvas, cobrindo situações distintas.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

Para uma condição crítica de casco e mar tem-se outra curva de resistência do navio - curva 2 na Figura 5.11. De acordo com o procedimento exposto, determina-se a curva de potência requerida para esta condição - curva II. A intersecção entre a curva de potência requerida nestas condições e a curva de potência de serviço contínuo do motor é o ponto B. Neste gráfico pode-se determinar não só a potência e rotação desenvolvidas pelo conjunto propulsor, mas também a velocidade do navio.

No entanto, se for desejável que o navio continue se deslocando com velocidade de serviço ou o mais próximo possível desta velocidade, o motor pode ser posto a funcionar em regime de potência máxima contínua e, em vez do ponto B, obtém-se como ponto de operação o ponto C, que determina a potência e a rotação desenvolvidas pelo motor bem como a nova velocidade do navio. Observe-se que este novo valor da velocidade não pode ser conhecido a priori. Somente com o traçado das referidas curvas é que se pode estabelecer o ponto de operação do sistema, bem como a velocidade do navio.

Generalizando, para qualquer outra condição da curva de resistência do navio, em consequência de modificação de condição do mar, estado de limpeza do casco ou deslocamento do navio, pode-se determinar a correspondente curva de potência.

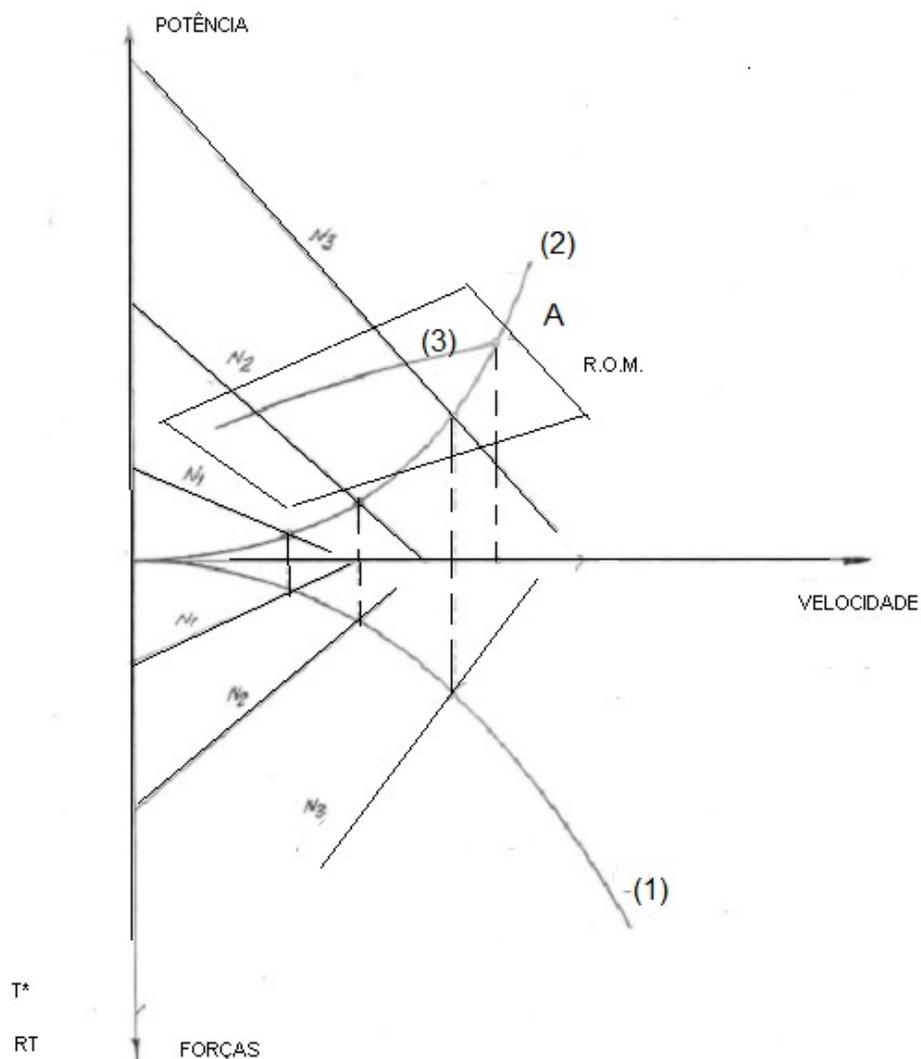


Figura 5.10 Integração casco hélice motor

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

Se for de interesse que se mantenha o motor trabalhando em regime de serviço contínuo, a intersecção desta curva do motor com a nova curva do conjunto casco-hélice determina o novo ponto de funcionamento. Deve-se observar, porém, que existe sempre um limite superior para a rotação do motor, e, em uma condição de diminuição de a resistência do navio, pode ocorrer que não haja intersecção entre as curvas de potência requerida e potência fornecida para uma dada posição das bombas injetoras. Este caso está mostrado no gráfico da Figura 5.11, onde a curva casco-hélice para condição de deslocamento parcial não intercepta a curva de serviço contínuo do motor. Neste caso, o motor passa a trabalhar numa curva de carga parcial para se ajustar aos requisitos de potencia do casco-hélice. Por outro lado, pode-se também pensar em manter constante a velocidade do navio independentemente de qualquer variação da curva de resistência do navio. Se for imposta esta condição, o motor deveria ser colocado em uma condição de operação que se ajuste a esta exigência, fornecendo a potência requerida à rotação desejada.

Os exemplos apresentados ilustram a aplicação do procedimento na análise de desempenho do sistema propulsor. Entende-se que, se o aluno tiver uma compreensão exata do procedimento exposto, terá uma ferramenta valiosa para resolução de uma série de outros problemas. Podem surgir diversas variantes em relação às situações mencionadas. A resolução do problema, no entanto, não foge ao encaminhamento apresentado na análise dos exemplos acima discutidos. Propõe-se que sejam agora resolvidos os itens (b) e (c) da questão ilustrativa.

# PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

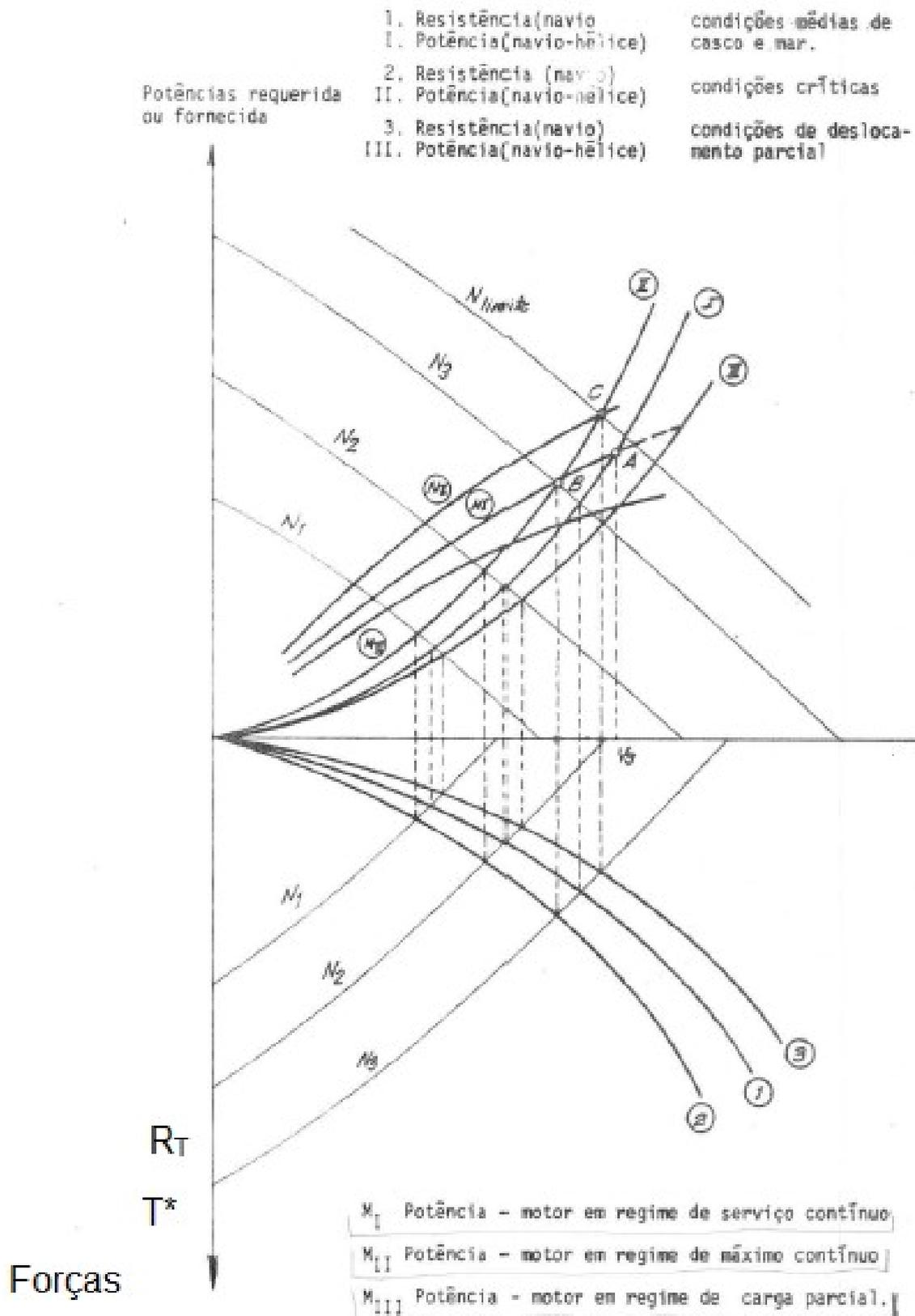


Figura 5.11 Integração casco hélice motor para diferentes condições de operação

### 7.8 Sistemas Propulsores com Hélice de Passo Controlável

O estudo apresentado do problema de desempenho do sistema propulsor se baseou na utilização de hélice de passo fixo. O procedimento empregado para integração casco-hélice - motor, embora possa ser estendido para sistema com hélice de passo controlável, não permite um tratamento tão simples. Para este caso, outros procedimentos podem ser mais vantajosos. Por exemplo, o emprego dos diagramas  $K_T$ ,  $K_Q$ ,  $J$ , para os quais se transfere as características do casco e do motor, para alguns problemas pode ser bastante satisfatório. Para se obter uma primeira visualização do problema é interessante recorrer a gráficos semelhantes ao mostrado na Figura 5.6. Neste caso, porém, em vez de uma única curva de potência requerida pelo conjunto casco-hélice ter-se-ia tantas curvas quantos os valores considerados para o passo (ou relação passo-diâmetro).

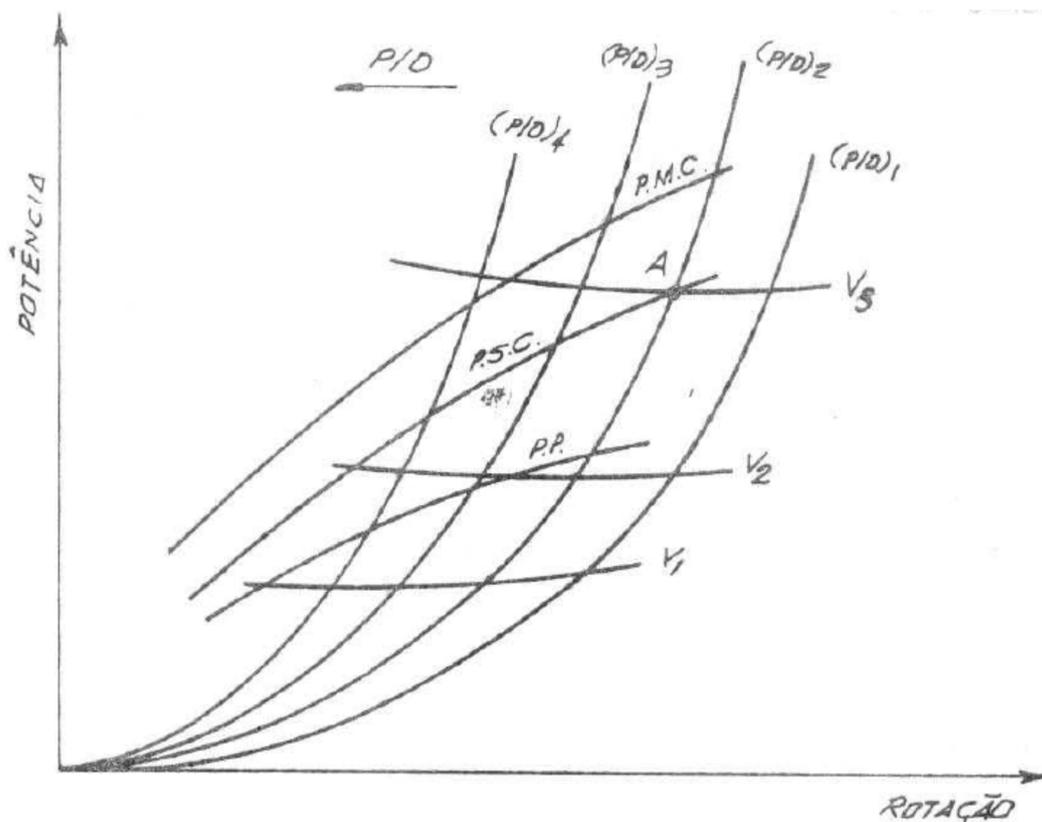
A Figura 5.12 é apresentada como ilustração para análise de desempenho de sistemas com hélice de passo controlável. Esta figura, como mencionado anteriormente, apresenta diversas curvas de potência requerida, cada uma delas correspondendo a uma relação passo-diâmetro.

Na Figura 5.12 são mostradas:

- a) curvas de potência fornecidas pelo motor para diferentes regimes de carga::
  - PMC - potência máxima contínua;
  - PSC – potência serviço contínua;
  - P.P. potência em carga parcial;
- b) Curvas de potência requerida pelo conjunto casco-hélice
  - para um dado deslocamento (projeto) e condições médias de casco e mar.
  - para diferentes razões passo- diâmetro do hélice.
- c) Curvas de potência requerida para manter velocidade constante do navio ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_s$ ) para variação do passo do hélice.

Uma análise da Figura 5.12 mostra que uma mesma velocidade do navio pode ser obtida para diversos valores da relação passo-diâmetro do hélice. É possível, desta forma, alterar o passo de modo que se atinja uma determinada velocidade com o menor consumo de potência, ou seja, com coeficiente propulsivo máximo. Por exemplo, para velocidade de serviço  $V_s$ , a menor potência é obtida a relação  $(P/D)_2$ , correspondendo a um ponto de operação do motor na curva de serviço contínuo.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS



**Figura 5.12** Representação das curvas de potência requerida para conjunto casco-hélice para diferentes razões passo- diâmetro

Adotando como critério de operação a maximização do coeficiente propulsivo (e, portanto, minimização da potência requerida) pode-se definir um lugar geométrico dos pontos de operação do sistema propulsor para diversos valores de velocidade do navio. Estes pontos são obtidos através de uma atuação conjunta sobre a injeção de combustível (curva de potência fornecida pelo motor) e sobre o passo do hélice (curva de potência requerida).

Em realidade, o critério mais interessante é o da minimização de consumo de combustível. Para este caso, admitindo-se que se disponha de um mapa de consumo específico do motor, deve-se minimizar produto potência requerida x consumo específico.

A aplicação deste critério nem sempre é possível, pois não se conhece a variação do consumo específico de combustível em toda a região de operação do motor.

Alguns comentários precisam ser feitos sobre o gráfico da Figura 5.12. O primeiro se refere à construção das curvas de potência requerida. O procedimento é uma generalização daquele empregado com hélice de passo fixo para construção do gráfico da 5.7.

Outra consideração diz respeito sobre à variação da relação passo-diâmetro na Figura 5.12. Está indicado nesta figura que o passo aumenta à medida que as curvas de potência requerida se aproximam do eixo de potência. Isto é, para uma dada velocidade do navio, a rotação do hélice diminui à medida que se aumenta o passo. Para a compreensão deste resultado convém recorrer ao

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

gráfico da Figura 5.8 bem como as equações (5.28) a (5.30). Uma generalização dessas equações para hélice de passo controlável conduz a:

$$T = T_0(N, P/D) - b'(N, P/D) V_a \quad (5.48)$$

$$T_0(N, P/D) = C_1(N) K_{T_0}(P/D) \quad (5.49)$$

$$b'(N, P/D) = C_1(N) / C_2(N) b(P/D) \quad (5.50)$$

Admitindo-se que as curvas (lineares)  $K_T(J)$  são paralelas para  $P/D$  diferentes, isto é:

$$K_T(P/D) = K_{T_0}(P/D) - b J$$

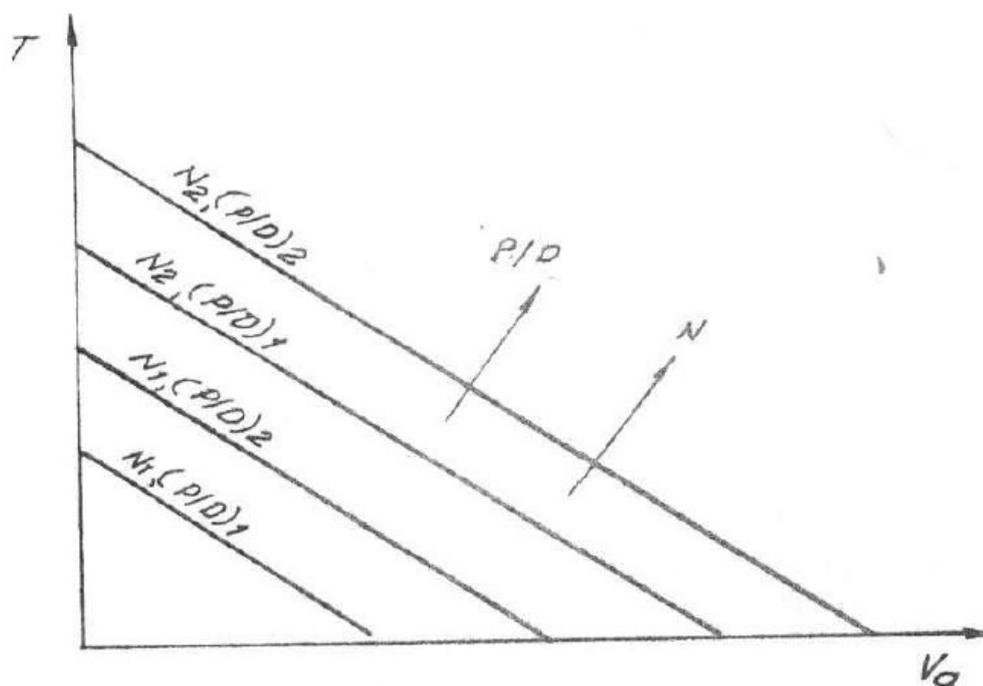
Ou seja, (5.50) se reduz a:

$$b'(N, P/D) = C_1(N) / C_2(N) \quad (5.51)$$

Como  $K_T$  aumenta com  $P/D$  (veja diagramas de séries sistemáticas de hélices), a equação (5.49) mostra que  $T_0$  para uma dada rotação cresce com o aumento do passo.

Finalmente, a equação (5.48) mostra que para rotação constante as curvas de empuxo contra velocidade de avanço se distanciam da origem, à medida que se aumenta a relação passo - diâmetro. A Figura 5.13 mostra este resultado.

A Figura 5.14 é uma generalização da Figura 5.8, onde se efetua a integração casco hélice. Neste caso, pode-se perceber que para se manter uma dada velocidade do navio a rotação do hélice diminui quando se aumenta a relação passo-diâmetro. Assim, para se conseguir velocidade  $V_1$  pode-se manter o hélice operando com passo  $P_1$  à rotação  $N_2$  ou com passo  $P_2$  e rotação  $N^*$  ( $N^* < N_2$ ).



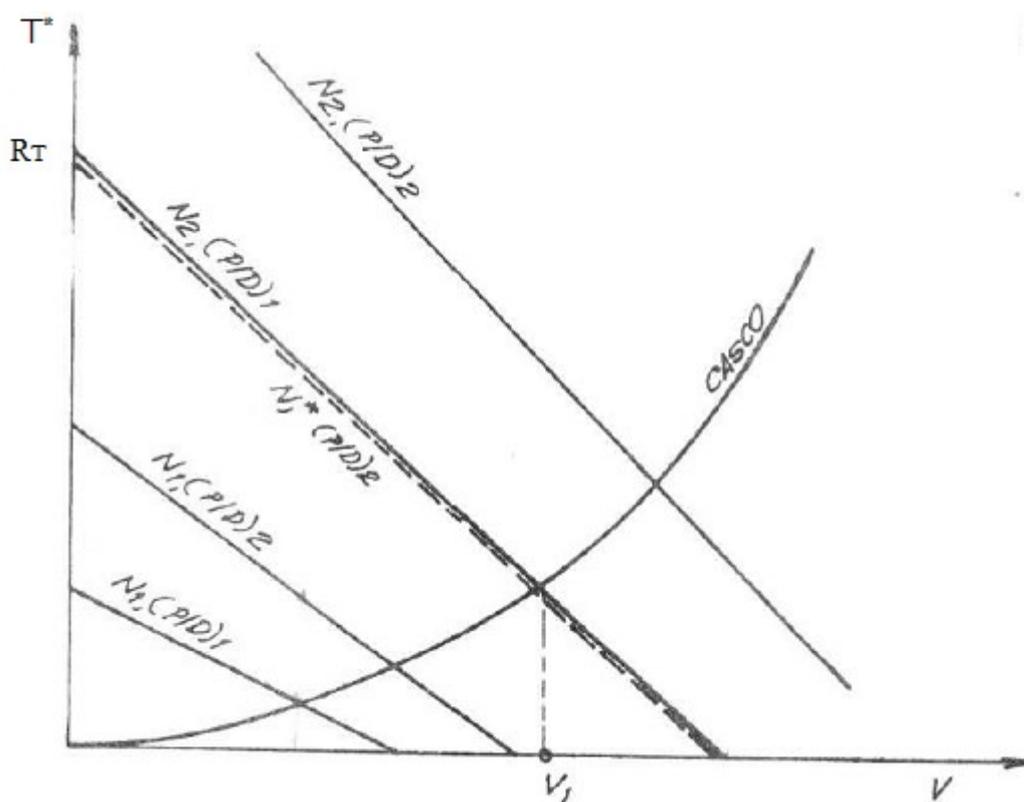
**Figura 5.13** Curvas Características de empuxo para um hélice de passo variável.

Pode-se perceber, pelo que foi exposto, que o gráfico da Figura 5.12 permite analisar o desempenho de sistemas com hélice de passo variável. Em alguns

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

casos, no entanto, é necessário recorrer a outros diagramas para se obter um entendimento perfeito do problema. Convém ainda observar que o procedimento básico, usado para hélice de passo fixo, poderia ser generalizado para propulsor com passo controlável. Um exame da Figura 5.13, porém, mostra que tal procedimento seria insatisfatório, uma vez que para cada valor do passo seria necessário desenhar uma curva  $T(V_a)_{N = cte.}$ . Assim, uma generalização da Figura 5.10 seria de reduzida utilidade em virtude da quantidade enorme de curvas necessárias.

Para emprego na análise de sistemas propulsores com hélice de passo controlável, portanto, é melhor trabalhar com o diagrama de potência versus rotação do motor. Apresenta-se na Figura 5.15 uma modificação do diagrama apresentado na Figura 5.12, demarcando a região de operação do motor.



**Figura 5.14** Integração Casco hélice para sistema com passo controlável.

O emprego de hélices de passo controlável é muitas vezes justificado como de proporcionar melhor eficiência do propulsor em diferentes condições de operação. Não é este, porém, o argumento principal para o seu uso em diversas embarcações. Para embarcações que tenham uma ou mais condições bem distintas de operação, o emprego de hélice de passo controlável é uma forma de adequar os requisitos de potência destas condições aos limites da região de operação do motor. Exemplos típicos destas embarcações são os pesqueiros de arrasto, os rebocadores e embarcações militares em geral.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

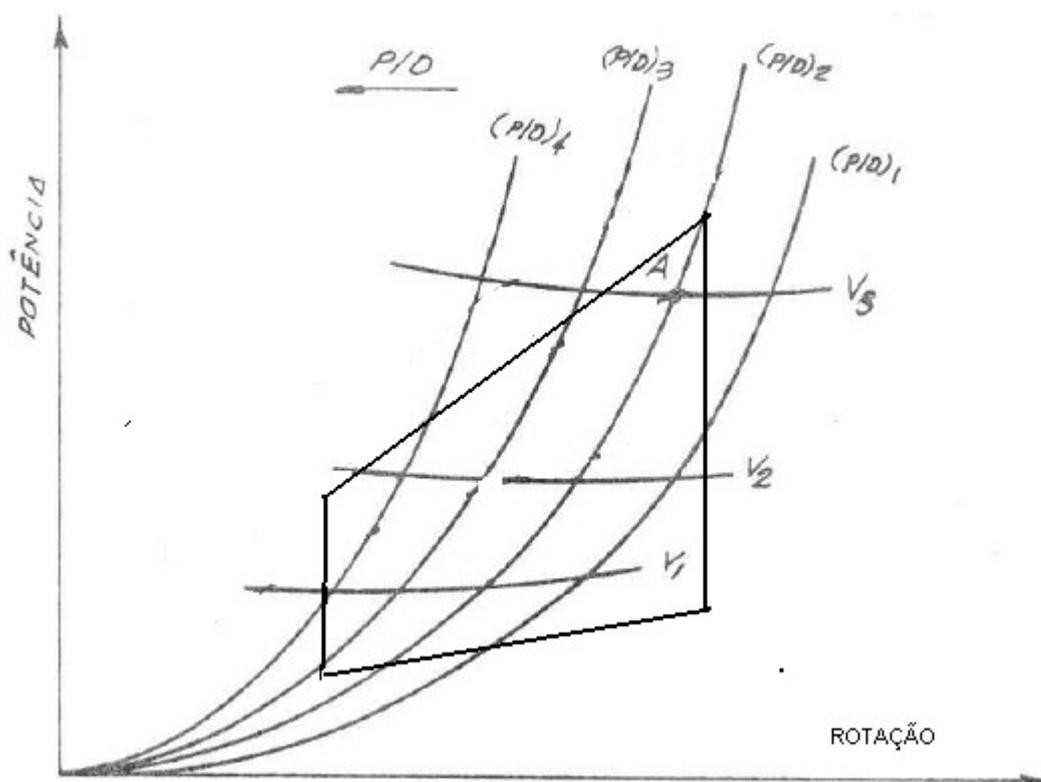


Figura 5.15 Diagrama para análise de desempenho de sistemas propulsores com hélice de passo controlável

### Lista de Exercícios

#### 1ª Questão

A instalação propulsora de um navio de cabotagem, que tem velocidade de serviço  $V_s$ , é constituída por um motor de potência normal  $Y$ , à rotação  $N_s$ , acoplado diretamente a um hélice de passo fixo.

Em um trecho de uma viagem o navio utilizou 70% de sua potência normal para atingir a velocidade  $V_s$ .

a) Apresentar um procedimento para determinar o deslocamento que o navio apresentava nesta situação. Admitir que, para uma dada velocidade, a resistência à propulsão varia com o deslocamento da seguinte forma:

$$RT / (RT) \Delta \text{proj} = (\Delta / \Delta \text{proj})^{2/3}$$

b) Como se determina a máxima velocidade que poderia ser atingida com este deslocamento?

c) Descrever o procedimento para determinar o menor deslocamento do navio que permitiria manter a velocidade  $V_s$  em condições médias de casco e mar? Admita que o motor possui, como limite inferior, uma pressão média efetiva igual a 30% do valor de serviço. Admitir as hipóteses que julgar necessárias para a resolução da questão, tendo o cuidado de justificá-las.

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

### 2ª Questão

A instalação propulsora de um barco pesqueiro foi projetada para a condição de corrida livre na qual a embarcação, em condições médias de casco e mar, deve ter uma velocidade de 8 nós. Não foi considerado o requisito da condição de arrasto, na qual a uma velocidade de 3 nós o barco tem que puxar uma rede.

A instalação é composta por um motor de potência normal 600 kW a 1200 rpm acoplado através de um redutor de razão 5:1 a um hélice de passo fixo.

Descrever os procedimentos para se determinar:

- a) a máxima velocidade que o navio, com deslocamento de projeto, atinge em prova de mar;
- b) a máxima força de arrasto que a instalação propulsora pode oferecer na velocidade de 3 nós.
- c) Admitindo que a força de arrasto obtida no item anterior seja 20% inferior ao valor desejado, dizer se com uma redução de velocidade seria possível atingir a força requerida.
- d) Qual a vantagem de se dispor de um hélice de passo controlável para o pesqueiro?

### 3ª Questão

A instalação propulsora de um navio, que apresenta 2 velocidades distintas de operação, é constituída por 4 motores acoplados através de embreagens e redutor a um único eixo propulsor.

Dois motores (M1) são de 6 cilindros, 4 tempos com potência normal 2500 kW à rotação 750 rpm. Os outros motores (M2) são de 8 cilindros, 4 tempos com potência normal 8500 HP à rotação 900 rpm.

Para a velocidade de operação mais baixa 16 nós, operam apenas os motores M1 e o hélice absorve potência 5000 kW à rotação 125 rpm.

Para a velocidade de operação mais alta, 24 nós, operam apenas os motores M2 e o hélice absorve a potência 17000 kW à rotação 150 rpm.

Deseja-se saber:

- a) o hélice do navio é de passo fixo? Justificar a resposta.
- b) se na condição de baixa velocidade, um dos motores M1 for desacoplado do sistema propulsor, qual a máxima velocidade que o navio pode atingir, admitindo que seja mantido o mesmo passo do hélice? Que modificação no passo você recomenda para aumentar a velocidade nesta condição?
- c) se um dos motores M1 sofrer avaria, e houver interesse de manter o navio na velocidade de 16 nós, você aconselharia a utilização de um dos motores M2? Justificar a resposta.
- d) que velocidade o navio atingiria se fossem acoplados simultaneamente os 4 motores ao eixo propulsor, mantendo-se o passo do hélice da condição de velocidade 24 nós?

Que modificação do passo você recomendaria nesta situação (4 motores em operação) para aumentar a velocidade?

## PNV3416 INSTALAÇÕES PROPULSORAS

### 4ª Questão

Uma embarcação é utilizada para rebocar em alto mar plataformas de prospecção de petróleo. A instalação propulsora desta embarcação foi projetada para satisfazer o requisito de fornecer uma força de tração de  $X$  toneladas à velocidade  $V$ .

A instalação é constituída por 2 motores de média rotação, com potência normal  $Y$  à rotação  $N_s$ , acoplados através de um redutor, de razão de redução  $r$ , a um hélice que na condição de projeto opera na rotação  $N_h$ .

a) Deseja-se saber qual a força de tração que a embarcação fornece a uma velocidade  $1,2 v$ .

Em uma data condição, ocorreu avaria em um dos motores, limitando a capacidade de reboque da embarcação.

b) Qual é a máxima força de tração nesta situação.

Admitir conhecidas a curva de resistência para o casco da embarcação, as curvas de empuxo de potência do hélice e a região da operação do motor.