

JOÃO MORO  
HERNANI LUIZ BRINATI

930

UM PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DA INSTALAÇÃO  
PROPULSORA DIESEL

VI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE  
MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA

Veracruz y Cd. de México, 16 al 22 de Septiembre de 1979

VI CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA NAVAL

Título: UM PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DA INSTALAÇÃO PROPULSORA  
DIESEL

Autores: João Moro  
Hernani Luiz Brinati

R E S U M O

Este trabalho aborda o problema da determinação de um mo  
delo que permita a sintetização e análise de desempenho de um gran  
de número de instalações propulsoras Diesel alternativas e conse-  
quente escolha da melhor solução no menor tempo possível. O modelo  
é formulado para atender os objetivos: estima de resistência a pro  
pulsão; escolha da instalação propulsora ótima para um casco; esco  
lha do hélice de máximo rendimento para um conjunto casco-motor.  
São mostrados e analisados alguns exemplos que ilustram a aplica-  
ção do modelo.

TITLE: A PROCEDURE FOR DIESEL POWER PLANT SELECTION

S U M M A R Y

This paper is concerned with the formulation of a proce  
dure which permits the synthesis of a large number of alternative  
Diesel power plants and the selection of the best solution in the  
shortest time as possible. The procedure is developed in order to  
meet the following purposes: evaluation of ship resistance, choice  
of the best propulsive system for a given ship hull, and selection  
of the most efficient screw for a given engine-hull combination. A  
set of examples are shown in order to illustrate the procedure  
application.

## 1. Introdução

Uma das características mais marcantes do projeto do navio é seu caráter eminentemente reiterativo, onde as soluções obtidas em estágios anteriores são analisadas, alteradas e refinadas, a fim de que se consiga obter o melhor sistema em função dos critérios, técnicos e econômicos adotados.

Dentro desse processo, algumas das mais importantes tarefas são a estima de resistência a propulsão e o cálculo do hélice. Estas tarefas, que no passado já eram de alta relevância, hoje são mais importantes uma vez que a crise energética atual torna imperativo a escolha do sistema mais eficiente, isto é, o de menor consumo de combustível. O problema de minimização do consumo de combustível se converte em uma maximização de coeficiente propulsivo, uma vez que o consumo específico dos motores atuais é praticamente igual.

Do quadro exposto acima é que se realça a necessidade de criação de modelos, que permitam a sintetização e análise de um grande número de instalações propulsoras Diesel alternativas e consequente escolha da solução ótima no menor tempo possível.

O problema a ser resolvido está ilustrado nas figuras que mostram duas condições diferentes da utilização do modelo.

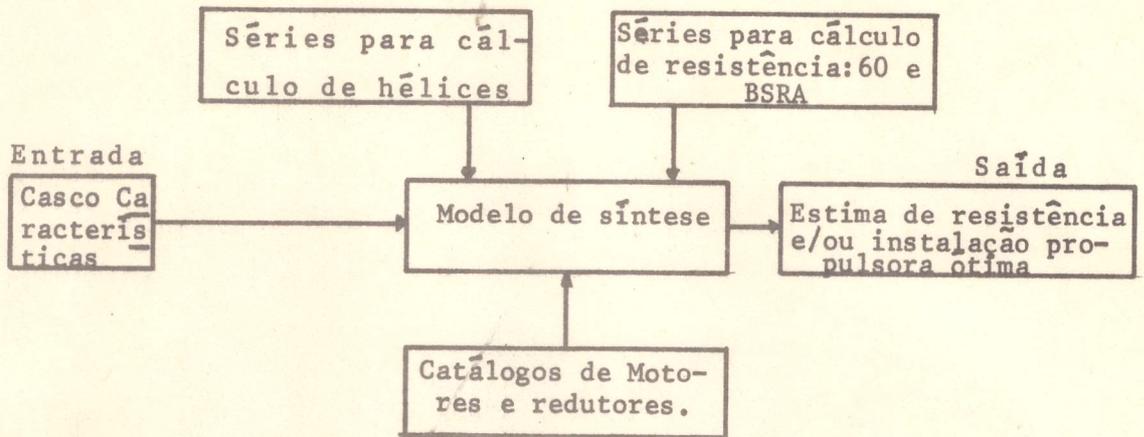


Fig. 1a - Representação esquemática do problema a ser resolvido  
(Schematic representation of the problem)

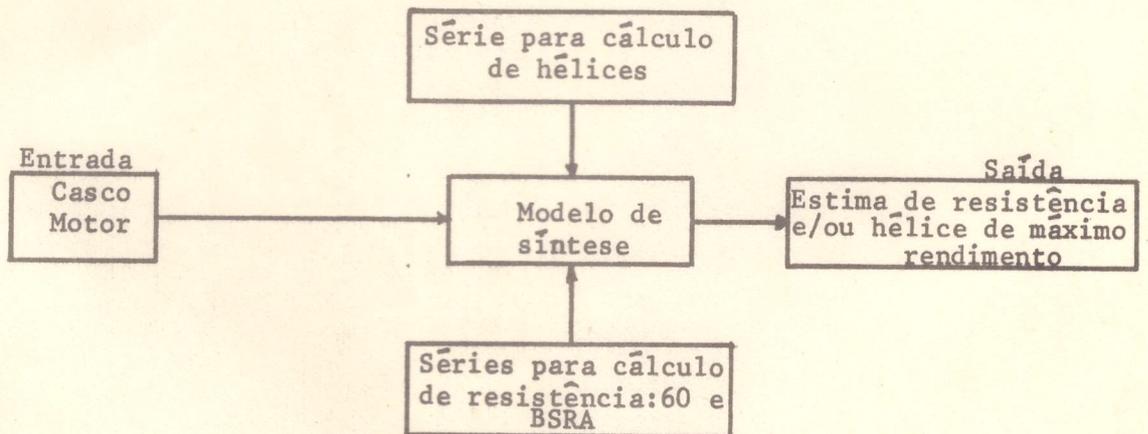


Fig. 1b - Representação esquemática do problema a ser resolvido  
(Schematic representation of the problem).

## 2. Objetivos

O objetivo primordial deste trabalho é o de elaborar um programa de computador que permita definir, de uma maneira rápida e sistemática, a instalação propulsora ótima, de acordo com um dado critério, utilizando motores diesel de baixa rotação (acoplamento direto) ou de média rotação (acoplamento com redução).

O modelo desenvolvido para síntese do sistema propulsor é suficientemente genérico de modo a tornar variável sua utilização - em uma larga faixa de aplicações. A flexibilidade do programa permite seu emprego em diversas fases do projeto como mostrado a seguir:

- 2a) em fase inicial do projeto preliminar, quando o casco ainda não está perfeitamente definido. Neste caso, o programa efetua uma estimativa da resistência a propulsão, através de séries sistemáticas e calcula o hélice e seleciona o motor (necessário para cálculo de pesos do navio).
- 2b) em uma fase mais adiantada do projeto, quando se dispõe da curva de resistência (mediante realização de ensaios) e se quer selecionar o melhor sistema propulsor.
- 2c) em uma terceira situação, quando já se dispõe de um casco e de um motor e se deseja determinar o hélice de máximo rendimento para este sistema, tal que o casco se desloque à velocidade de projeto.

## 3. Instalação Propulsora Ótima

A escolha de uma instalação propulsora é influenciada por diversos fatores, tais como custo inicial, peso, espaço ocupado, confiabilidade, tipo de combustível, consumo específico de combustí-

vel, etc. Para levar em consideração todas essas variáveis seria necessário recorrer a um critério misto que ponderasse tanto os fatores econômicos como os fatores técnicos. Como este critério requer o conhecimento de uma série de informações, nem sempre disponíveis, ele não será utilizado.

Um critério mais simples de escolha seria o de minimizar o consumo de combustível, que depende da potência instalada e do consumo específico do motor. Consumo específico de combustível e a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência por unidade de tempo.

A potência (BHPH) requerida para satisfazer os requisitos de projeto, está selecionada com a potência efetiva (EHP) através do coeficiente propulsivo ( $C_p$ ) pela fórmula

$$C_p = EHP/BHPH$$

$$C_p = \eta \cdot e_h \cdot e_t \cdot e_r \cdot e_{rr}$$

- $\eta$  - eficiência do hélice em água aberta;
- $e_h$  - eficiência do casco;
- $e_t$  - eficiência de transmissão mecânica; não incluindo perdas no redutor, quando for o caso;
- $e_r$  - eficiência do redutor;
- $e_{rr}$  - eficiência relativa rotativa.

O critério utilizado neste trabalho é de minimizar a potência requerida para satisfazer os requisitos de projeto do navio. Não é incluído no critério o consumo específico pois não se dispõe usualmente de mapa de consumo para toda região de operação do

motor. Só se conhece o valor para condição do projeto que, por sua vez, é praticamente igual para todos os motores.

#### 4. Resolução do Problema

##### 4.1 - Diagrama de blocos do modelo.

O modelo de síntese elaborado pode ser visualizado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 2. As variáveis ISM e KT2 são usadas para especificar o tipo de problema que se quer resolver:

- ISM = 0, se os objetivos são aqueles definidos por 2a e 2b;
- ISM  $\neq$  0, se os objetivos são aqueles definidos por 2c;
- KT2 < 0, se o cálculo de EHP deve ser feito pela série 60;
- KT2 = 0, se o cálculo de EHP deve ser feito pela série BSRA;
- KT2 > 0, se a curva de EHP x V é fornecida; (V - velocidade do navio).

Um exame do diagrama de blocos possibilita identificar as diversas etapas de cálculo do modelo de síntese. Algumas dessas fases já estavam prontas e receberam apenas algumas modificações para serem acopladas ao programa geral. As etapas que foram desenvolvidas no trabalho são descritas a seguir. Para uma explicação mais detalhada é aconselhável recorrer a referência (1).

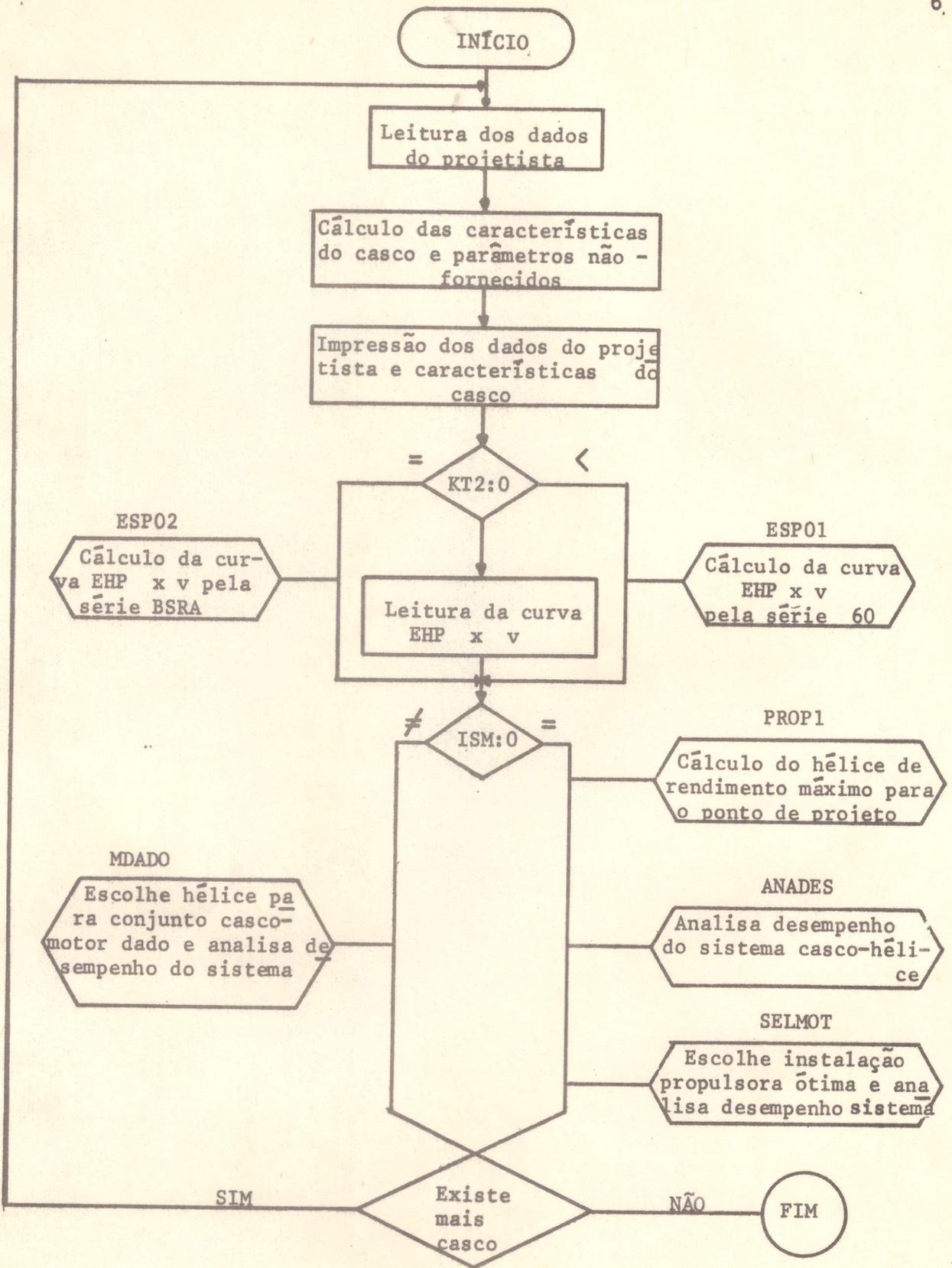


Fig. 2 Diagrama de blocos para a seleção da instalação propulsora.  
(Block diagram for the power plant selection procedure).

#### 4.2 - Cálculo do hélice de máximo rendimento.

Foi otimizado o procedimento desenvolvido por Szajnbok (2). O método de busca utilizado em (2) para calcular o hélice de máximo rendimento é o de busca exaustiva com o campo de definição das variáveis dado por:

$$0,7 \text{ DRMAX} \leq D \leq \text{DRMAX}$$

$$0,4 \leq A_e/A_o \leq 1,0$$

$$0,5 \text{ DRMAX} \leq p \leq 1,4 \text{ DRMAX}$$

onde:

D - diâmetro do hélice

p - passo do hélice

$A_e/A_o$  - razão de área expandida

DRMAX - máximo valor do diâmetro (estabelecido pelas folgas existentes na popa do casco).

São ainda aplicadas restrições relativas ao limite de cavitação; à razão passo diâmetro (P/D),  $0,5 \leq p/D \leq 1,4$ , e a rotação (N), levando em consideração a faixa de rotação dos motores contidos no "Catálogo de Motores".

O campo de variação dos parâmetros D,  $A_e/A_o$  e P/D, em conjunto com a precisão estabelecida para cálculo do propulsor e o esquema de busca, determina o número total de hélices calculados.

Um exame do procedimento de cálculo do hélice mostrou que se podia orientar o esquema de busca de modo a reduzir o número de propulsores investigados. As seguintes considerações foram utilizadas.

a) Verifica-se que o rendimento do propulsor diminui quando se aumenta o diâmetro mantendo-se livres as outras variáveis em espe

cial a rotação. Assim, decidiu-se impor a seguinte restrição ao processo de busca: se o rendimento máximo de hélices de diâmetro  $D_2$  ( $D_2 = 0,97 DR_{MAX}$ ) for inferior ao rendimento máximo de propulsores de diâmetro  $DR_{MAX}$ , não se pesquisa hélices com diâmetro inferior a  $D_2$ .

- b) Verifica-se, por outro lado, que a curva de eficiência em função da razão passo-diâmetro do propulsor é unimodal com um máximo global. Assim, a pesquisa de propulsores com variação de  $P/D$ , a partir de seu valor mínimo, se faz até se obter derivada nula desta função.
- c) O cálculo de cavitação se faz utilizando os resultados experimentais de Burril (3). Verifica-se com este critério que se para um determinado par de valores  $A_e/A_o$  e  $D$ , o hélice de razão  $(P/D) = (P/D)_1$  apresenta problema de cavitação, qualquer hélice de razão  $(P/D) > (P/D)_1$  também apresentará esse problema. Portanto, não é necessário prosseguir a busca.

#### 4.3 - Escolha da instalação propulsora ótima.

Antes de se apresentar a solução para escolha da instalação propulsora ótima são definidos para motores de baixa rotação (acoplamento direto) duas classes: motores compatíveis e admissíveis.

Com o hélice de rendimento máximo determinado em 4.2 tem-se:

BPH - potência requerida do motor para satisfazer os requisitos de projeto;

ROT - rotação que o hélice deve trabalhar para satisfazer os requisitos de projeto;

$\eta_o$  - eficiência do hélice de máximo rendimento.

Para os objetivos deste trabalho será usada a seguinte notação:

- potência nominal (BHPM), correspondendo a potência de serviço contínuo do motor.
- rotação nominal (ROTM), correspondendo a rotação de serviço contínuo do motor.

A classe de motores compatíveis é definida como aquela cujos motores são capazes de fornecer a potência BHPH à rotação ROTH num regime entre 95% a 100% da carga nominal e numa rotação entre 95% a 100% da rotação nominal; ou seja, motores compatíveis são aqueles que satisfazem os requisitos:

$$a) \text{ BHPM/ROTM} \geq \text{BHPH/ROTH} \geq 0,95 \text{ BHPM/ROTM}$$

$$b) 0,95 \leq \text{ROTH/ROTM} \leq 1,0$$

A classe de motores admissíveis é definida como aquela cujos motores possuem a rotação nominal compreendida entre 0,833 ROTH e 1,25 ROTH, e cuja potência nominal esteja compreendida entre BHPH e 1,388 BHPH.

Os valores indicados acima decorrem de se considerar uma relação linear entre potência e rotação para uma dada condição de carga no motor.

Em função das classes de motores definidas podem ocorrer uma das seguintes condições:

- a) Existe motor compatível

Existindo motor(es) compatível(eis) no "Catálogo de Motores", a instalação propulsora ótima está determinada, não precisando pesquisar instalações com engrenagem redutora. De fato, o coeficiente propulsivo é máximo ou, seja a potência requerida é mínima. Um cri

tério adicional é usado quando se precisa selecionar o motor compa  
tível mais conveniente.

b) Não existe motor compatível mas existe motor admissível

De acordo com a definição de motores admissíveis, duas situa-  
ções podem ocorrer: ou o motor não pode dar a potência requerida -  
pelo hélice por incompatibilidade de rotação ( $ROT_M < ROT_H$ ); ou o -  
motor é subutilizado, já que em nenhuma condição ele estará forne-  
cendo a potência nominal ( $ROT_M > ROT_H$ ).

Em ambos os casos mencionados, é necessário que seja calcula-  
do um novo hélice (hélice subótimo), usando como dados de entrada  
o conjunto motor admissível - casco. Na seção seguinte é descrito  
o procedimento para seleção deste hélice. Também aqui um critério  
adicional é utilizado, quando necessário para definir o motor ad-  
missível mais conveniente.

Uma vez que o novo hélice escolhido não é o de máximo rendi-  
mento, é necessário efetuar uma comparação de coeficiente propul-  
sivo entre a instalação direta obtida e a instalação com redução  
que usa o hélice ótimo. É, portanto, uma questão de se verificar  
se queda na eficiência do propulsor é compensada ou não pela efi-  
ciência do redutor.

c) Não existe motor compatível nem motor admissível.

Neste caso, a instalação propulsora escolhida é constituída  
pelo hélice ótimo, com motor de média rotação e um redutor conve-  
niente. O procedimento para escolha da instalação com redução é a  
presentado na seção 4.5.

Embora os detalhes para seleção do hélice sub-ótimo e do con-  
junto motor-redutor sejam apresentados nas seções seguintes, já é  
possível esboçar um diagrama de blocos do processo global de esco-  
lha da instalação propulsora ótima. Este diagrama é apresentado -

na Figura 3.

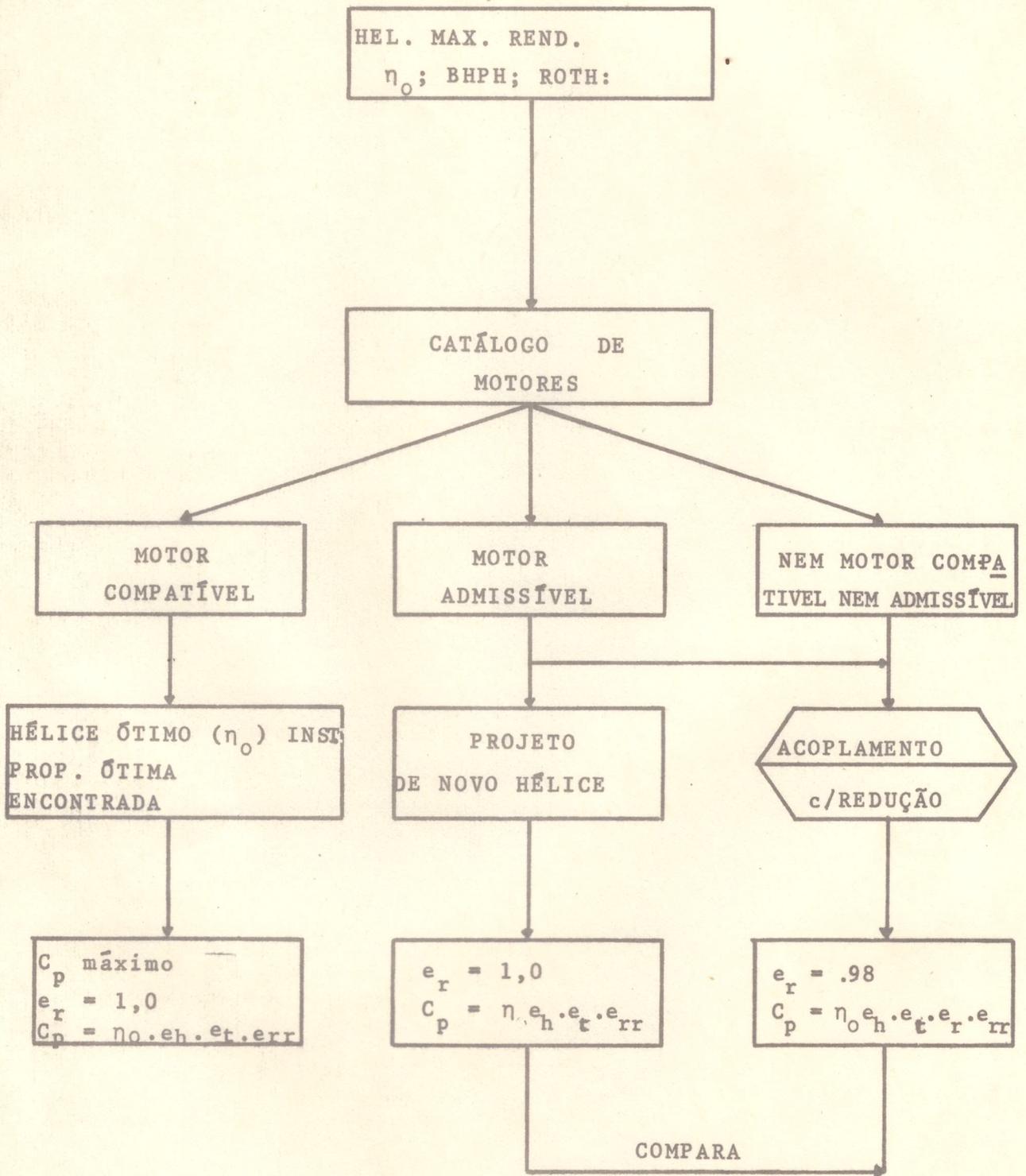


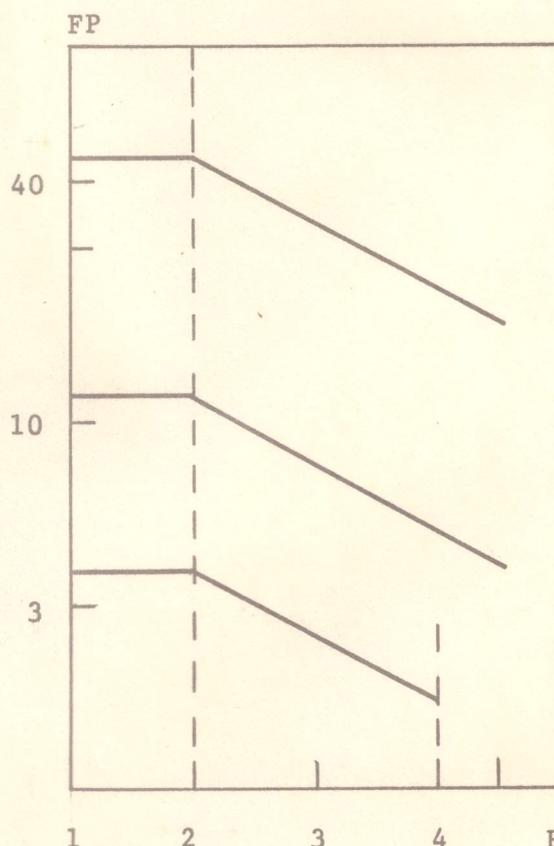
Fig. 3 Escolha da instalação propulsora ótima  
(Selection of the best Diesel power plant).

nalizar o problema de interação motor-redutor-hélice. Para tanto, são definidas as variáveis:

- fator de potência do redutor,  $FP = BHPM/ROTM$
- razão de redução  $R = ROTM/ROTH$

Os redutores possuem uma região de operação bem definida em termos dos parâmetros FP e R. A figura 4, que é uma reprodução esquemática de gráficos fornecidos pelos fabricantes de redutores, ilustra este fato.

Fig. 4 Região de operação do redutor.  
(Operation region for the reduction gear).



O motor escolhido é viável se o ponto de projeto resultante (FP, R) estiver na região de operação de algum dos modelos de redutor mostrado na Figura 4.

O redutor selecionado é o de menor tamanho cuja região de operação contenha o ponto de projeto.

Se o motor for inviável em face dos redutores disponíveis, é escolhido um outro motor até que se consiga uma compatibilidade

#### 4.4 - Escolha de hélice para conjunto casco motor

O procedimento descrito a seguir se aplica tanto para o casco de se ter um conjunto motor admissível - casco, como descrito na - secção anterior, como para o caso em que o projetista já tiver definido o casco e o motor.

O hélice selecionado é aquele que, podendo absorver a potência nominal do motor, apresenta a maior eficiência para as condições de projeto. Para se determinar este hélice escolhe-se, em uma etapa intermediária, o propulsor de maior rendimento para a condição de potência e rotação nominais do motor. Em geral, a potência nominal do motor é maior que a requerida ( $BHPM > BHPH$ ) para a velocidade de serviço,  $V_s$  e, no ponto de projeto, esta instalação propulsora permite que o navio se desloque em uma velocidade mais alta. A partir de uma análise do desempenho da instalação propulsora define-se a rotação em que o hélice deve operar para a velocidade  $V_s$ . Este valor de rotação é utilizado, então, como aproximação para otimizar o novo hélice. Os resultados dos testes efetuados mostram que a aproximação é boa e o hélice assim determinado absorve a potência nominal do motor.

#### 4.5 - Escolha do sistema ótimo para acoplamento com redução.

O sistema ótimo, neste caso, inclui sempre o propulsor de maior eficiência para as condições de projeto. Ficam definidos, portanto, os valores de  $C_p$ ,  $BHPH$  e  $ROTH$ .

O problema, então, se reduz à escolha do conjunto motor redutor mais adequado. Inicialmente escolhe-se o motor que tenha potência nominal maior que a potência requerida ( $BHPM > BHPH$ ) procurando, no entanto, minimizar essa margem.

Para verificar se o motor escolhido é viável, é necessário a-

do conjunto motor-redutor-hélice.

## 5. Resultados

São apresentados nesta seção dois exemplos de aplicação do modelo de síntese. Os resultados são acompanhados de comentários ilustrativos.

### 5.1 - Exemplo 1

Este exemplo ilustra a aplicação do procedimento para cálculo da instalação propulsora ótima (motor de baixa rotação-hélice) para um casco dado.

A tabela 1, apresentada a seguir, mostra os dados de entrada do problema.

Tabela 1 - Dados de Entrada

Comprimento entre PP -----	216.00 M
Boca moldada -----	30.60 M
Calado de projeto -----	11.34 M
Deslocamento total -----	57607.00 TON
Velocidade de projeto -----	17.50 NOS
Número de pás do hélice -----	4
Imersão do eixo -----	5.86 M
Diâmetro máximo -----	7.45 M
Índice de cavitação-sigma -----	0.200
Coefficiente de empuxo p/cavitação-tau -----	0.090
Adimensional-c -----	0.766890
Densidade média da água na rota -----	104.61 kgf.s <sup>2</sup> /M <sup>4</sup>
Pressão de vapor média na rota -----	250.00 kgf/M <sup>2</sup>
Coefficiente de esteira -----	0.327
Coef. de redução da força propulsora -----	0.196
Eficiência de transmissão -----	0.970
Eficiência relativa rotativa -----	1.030
Fator de serviço -----	1,25
Acréscimo devido a apêndices, ar, etc. -----	1.08

A aplicação do modelo de síntese fornece uma série de resultados que podem ir da resistência a propulsão até as características

Tabela 2 - Principais Resultados

1 - Características do propulsor de rendimento máximo

Valores obtidos para a velocidade de projeto e condições de projeto.

Diâmetro do hélice -----	7,450 m
Passo -----	6,239 m
Razão passo/diâmetro -----	0,838
Razão de área expandida -----	0,704
Rendimento do hélice em água aberta -----	0,542
Coefficiente propulsivo -----	0,647
Rotação -----	100,606 rpm
Potência efetiva (EHP) -----	17029
Potência (BHP)-Cond. de serviço -----	26328

2 - Motores Compatíveis

FÁBRICA	TIPO	CILIN ROS	POTÊNCIA NOMINAL	ROTAÇÃO NOMINAL
MEP-MAN ..	KSZ 105/180	8	27200	101
ISHIBRAS	RND 105	8	27200	103

3 - Motor escolhido

Tipo -----	KSZ 105/180
Número de cilindros -----	8.
Fábrica -----	MEP-MAN
Potência nominal -----	27200. HP
Rotação nominal -----	101. RPM
Comprimento total -----	18720. MM
Largura -----	5300. MM
Altura total -----	11610. MM
Altura de desmontagem -----	14265. MM
Peso seco, soldado, com mancal de escora -----	1150. TON
Altura da base a linha de centro do eixo -----	1540. MM
Curso do pistão -----	1800. MM
Diâmetro do cilindro -----	1050. MM

do motor escolhido, bem como uma análise do desempenho do sistema propulsor. Neste exemplo, a curva de resistência foi um dado de entrada por se tratar de um navio conhecido. A tabela 2 reproduz alguns dos resultados obtidos.

Examinando a tabela 2 verifica-se que há dois motores compatíveis apresentando a mesma potência nominal. Entre esses motores - foi selecionado aquele cuja rotação nominal mais se aproxima da rotação do hélice

Uma outra potencialidade do modelo de síntese não mencionado anteriormente, é de efetuar uma análise do desempenho do sistema propulsor. Esta análise consiste em se determinar para diversos valores de velocidade do navio as condições de operação do sistema propulsor - potência, rotação e coeficiente propulsivo. Para este cálculo são usadas a curva de resistência de casco e as curvas características do hélice selecionado. A tabela 4.3 mostra o desempenho do sistema propulsor para o exemplo considerado.

Tabela 3 Desempenho do sistema propulsor

Velocidade (nós)	Coeficiente propulsivo	Potência BHP	Rotação (rpm)	Regime de carga(%)	Regime de rot.
14.00	0.662	11939.	78.03	56.65	77.49
14.50	0.661	13390.	81.01	61.19	80.45
15.00	0.660	15001.	84.06	66.07	83.47
15.50	0.658	16777.	87.15	71.27	86.55
16.00	0.656	18757	90.34	76.87	89.72
16.50	0.653	20999.	93.65	83.01	93.00
17.00	0.650	23493.	97.06	89.62	96.38
17.50	0.647	26328.	100.61	96.89	99.91
18.00	0.642	29706.	104.46	105.28	103.74

## 5.2 - Exemplo 2

Este exemplo ilustra a aplicação do modelo de síntese para cálculo do hélice ótimo para um conjunto casco motor. A tabela 4 mostra os dados de entrada, incluindo características principais de casco e motor bem como informações adicionais para o cálculo do sistema.

Tabela 4 Dados de Entrada

Comprimento entre PP -----	134.16 M
Boca moldada -----	20.42 M
Calado de projeto -----	8.82 M
Deslocamento total -----	18462.00 TON
Velocidade de projeto -----	14.90 NOS
Número de pás do hélice -----	4
Imersão do eixo -----	4.00 M
Diâmetro máximo -----	4.90 M
Índice de cavitação-sigma -----	0.200
Coefficiente de empuxo p/cavitação-Tau -----	0.090
Adimensional-C -----	0.766890
Densidade média da água na rota -----	104.61 kgf/M <sup>4</sup>
Pressão de vapor média na rota -----	250.00 kgf/M <sup>2</sup>

Os coeficientes, eficiências e pesos abaixo, foram fornecidos pelo projetista ou adotados

Coefficientes de esteira -----	0.280
Coef. de redução da força propulsora -----	0.180
Eficiência da transmissão -----	0.980
Eficiência relativa rotativa -----	1.030
Fator de serviço -----	1.00
Acrêscimo devido a apêndices, ar, etc. -----	1.08

## Características principais do motor

Potência CSR -----	7140.
Rotação CSR -----	134.
Potência MCR -----	8400.
Rotação MCR -----	140.

A tabela 5 mostra as características principais do hélice calculado. Este é o propulsor de máximo rendimento para condição de projeto que é capaz de absorver a potência nominal do motor a rotação nominal.

Tabela 5 - Características do Hélice Ótimo

Número de pás -----	4
Diâmetro do hélice -----	4.900 M
Passo -----	4.089
Razão passo/diâmetro -----	0.834
Razão de área expandida -----	0.580
Rendimento do hélice em água aberta -----	0.575
Coefficiente propulsivo -----	0.661
Rotação -----	131.058
Potência efetiva (EHP) -----	4363.
Potência (BHP)-cond. fator de serviço -----	6596.

## 6. Conclusões.

O modelo de síntese de propulsão é uma sistemática do procedimento, de escolha do conjunto propulsor com instalação Diesel. Constitui, portanto, uma ferramenta de grande utilidade no projeto do navio.

O modelo de síntese desenvolvido foi otimizado, em relação a tempo de processamento, obedecidas as restrições do método de busca utilizado. Consegue-se determinar o hélice ótimo, escolher o motor mais adequado, além de efetuar a análise de desempenho do sistema propulsor em um tempo relativamente pequeno.

O modelo de síntese, além de selecionar a instalação propulsora, permite analisar o desempenho do sistema. Para condições usuais de operação determina-se a potência requerida quando o navio tiver que trabalhar em outra velocidade. A análise do comportamento do navio em prova de mar permite uma avaliação perfeita por parte do armador, estabelecendo condições de aceitação do navio.

A figura de mérito permite determinar o sistema com mínima potência requerida. Dado que, para condições de projeto quase todos

os motores apresentam mesmo consumo específico de combustível, a instalação propulsora escolhida é a de menor consumo de combustível. Deve-se, entretanto, ter cuidado de verificar se o motor trabalha nas condições de serviço contínuo, e qual a variação de consumo específico quando operar fora dessas condições. Isto não foi feito pela ausência de mapas de consumo dos motores.

#### REFERÊNCIAS

- (1) MORO, J. Modelo de Síntese de Propulsão. Dissertação apresentada à EPUSP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 1979.
- (2) SZAJNBOK, M. & FREITAS, P.T.R., Instalações Propulsoras Diesel. Programa Final - Projeto NDPN-509, São Paulo, 1975.
- (3) TODD, F.H. Resistance and propulsion. In: Principles of naval architecture. New York, SNAME, 1967, Chapter VII, section 16 (Cavitation).

#### AGRADECIMENTOS

A FAPESP, FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO pelo apoio que prestou a essa pesquisa.

A FINEP, Financiadora de Estudos e Projetos que está apoiando o programa de pesquisa do Depto. de Engenharia Naval da EPUSP, do qual faz parte este trabalho.