

014

São Paulo
2003

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

**PROPOSTA DE REFORMA DA INSTALAÇÃO
PROPULSORA DE UMA CORVETA**

GONZALO JAVIER CARRERA MAZUELOS

GONZALO JAVIER CARRERA MAZUELOS

**PROPOSTA DE REFORMA DA INSTALAÇÃO
PROPULSORA DE UMA CORVETA**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Hernani Luiz Brinati**

**São Paulo
2003**

**Dedico este trabalho à Tatiana,
minha esposa, e ao meu filho
Diego. Por tudo o que
significaram para mim somado à
força e à motivação que me deram
para vencer mais esta etapa.**

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica de USP pela oportunidade de graduar-me. Podendo, a partir de agora, ter o prestígio de ser considerado mestre em Engenharia Naval e Oceanica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hernani Luiz Brinati, pela compreensão, ensino e orientação proporcionados não só na execução desta dissertação, mas também no aprendizado de conceitos importantes no estudo da engenharia naval.

Aos todos os professores que tive nas diferentes disciplinas cursadas durante o mestrado, em especial ao Prof. Dr. Hélio Morishita e ao Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr., pela sua dedicação e ensino proporcionado.

À minha esposa pela compreensão que tivera em meus períodos mais críticos, por nunca deixar de confiar em minha potencialidade. De forma que, sem tal respaldo, nada faria sentido.

Aos todos os amigos e funcionários do Departamento de Engenharia Naval e Oceanica, pela cordialidade e hospitalidade com que me receberam, além do importante apoio recebido durante este tempo.

Aquele em quem me apoiou, que nutriu-me de forças e acima de tudo possibilitou-me subir um degrau de toda uma escada que vem pela frente: DEUS.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SÍMBOLOS
RESUMO
ABSTRACT

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Identificação do problema	1
1.2 - Revisão bibliográfica.....	4
1.3 - Objetivo do trabalho.....	9
1.4 - Organização do trabalho.....	9

CAPÍTULO 2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PROJETO DE INSTALAÇÃO PROPULSORA

2.1 - Projeto de instalação propulsora	12
2.2 - Procedimento para seleção da instalação propulsora.....	15
2.2.1 - Características gerais das instalações propulsoras.....	16
2.2.2 - Matriz de decisão.....	20
2.3 - Cálculo da potência instalada.....	21
2.3.1 - Resistência ao avanço.....	22
2.3.2.- Resistência devido ao vento.....	23
2.3.3.- Coeficientes de interação casco-hélice.....	23
2.3.4.- Outros coeficientes.....	25
2.3.5.- Potência requerida da máquina.....	26
2.4 - Método de Holtrop.....	27
2.5 - Efeitos da deterioração do casco sobre o desempenho da instalação propulsora.....	29
2.5.1 - Método "BSRA".....	29

2.5.2 - Rugosidade inicial do casco.....30

2.5.3 - Incremento da rugosidade com a vida útil do navio.....32

2.5.4 - Aperfeiçoamentos na proteção do casco.....38

2.6 - Perdas na eficiência do hélice.....39

2.7 - Efeitos da rugosidade do casco nos coeficientes de

interação casco-hélice.....42

2.8 - Procedimento para análise do desempenho da

instalação propulsora.....45

2.8.1 - Curva característica do casco.....45

2.8.2 - Curvas características do hélice.....46

2.8.3 - Curvas características do motor.....49

2.8.4 - Procedimento para integração casco-hélice-motor.....50

CAPÍTULO 3 - OS NAVIOS MILITARES

3.1 - Características específicas dos navios de guerra.....52

3.2 - Instalações propulsoras usadas em navios militares.....56

3.3 - Instalações propulsoras empregadas em corvetas.....60

CAPÍTULO 4 - A CORVETA E SUA INSTALAÇÃO PROPULSORA

4.1 - Requisitos de missão.....66

4.2 - Dimensões principais e características do navio.....68

4.3 - Instalação propulsora original.....69

4.3.1 - Motores principais.....71

4.3.2 - Engrenagem redutora.....73

4.3.3 - Eixos.....75

4.3.4 - Hélices.....75

4.4 - Modificação do projeto original.....76

4.4.1 - Sistema "Hyperbar".....77

4.5 - Descrição do desempenho atual da instalação propulsora.....79

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

5.1 - Avaliação do projeto.....	81
5.1.1 - Tipo de instalação propulsora.....	82
5.1.2 - Cálculo da resistência ao avanço.....	85
5.1.3 - Requisitos de potência.....	90
5.1.4 - Avaliação da potência instalada.....	92
5.1.5 - Avaliação da seleção do conjunto propulsor.....	93
5.1.6 - A descarga de gases submarina.....	95
5.2 - Análise de desempenho da instalação propulsora.....	99
5.2.1 - Exame das condições de acoplamento.....	99
5.2.2 - Conseqüências do uso da câmara hyperbar.....	104
5.2.3 - Avaliação dos efeitos do incremento da rugosidade no casco da corveta "Delfim".....	106
5.2.4 - Análise de desempenho da instalação propulsora para diferentes condições de operação.....	108

CAPÍTULO 6 - PROJETO DE NOVA INSTALAÇÃO PROPULSORA

6.1 - Discussão preliminar da nova instalação propulsora.....	113
6.2 - Alternativas para nova instalação propulsora.....	117
6.3 - Avaliação das alternativas.....	119
6.3.1 - Atribuição dos pesos.....	120
6.3.2 - Atribuição das notas.....	123
6.3.3 - Matriz de decisão.....	128
6.4 - Escolha da nova instalação propulsora.....	129

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 - Síntese do trabalho.....	130
7.2 - Conclusões.....	131
7.3 - Recomendações.....	134

ANEXOS.....	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
APÊNDICE	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de Burril para previsão de cavitação	14
Figura 2.2 – Envolvórias para obtenção dos valores de rugosidade em MAA	
e em MHR	30
Figura 2.3 – Influência das incrustações na resistência ao avanço nos testes	
do navio “Yayoi-Maru”	35
Figura 2.4 – Variação de K_T , K_Q , e η_0 com a rugosidade.....	40
Figura 2.5 – Curvas características do casco.....	45
Figura 2.6 – Curvas características de K_T e K_Q para um hélice de passo	
fixo.....	46
Figura 2.7 – Modificação da curva característica de empuxo do hélice.....	47
Figura 2.8 – Modificação da curva característica do coeficiente de torque do	
hélice.....	48
Figura 2.9 – Curvas características do motor.....	49
Figura 2.10 – Integração casco-hélice.....	50
Figura 2.11 – Curva de potência requerida para o conjunto casco-hélice.....	51
Figura 2.12 – Integração casco-hélice-motor.....	51
Figura 3.1 – Efeitos dos requisitos de desempenho das corvetas	
classe “Inhúma” sobre o projeto de sua	
instalação propulsora.....	55
Figura 4.1 – Disposição dos motores e eixos na corveta “Delim”	70
Figura 4.2 – Esquema do sistema de sobrealimentação do motor.....	72

Figura 4.3 – Curva característica de operação do motor	74
Figura 4.4 – Disposição dos hélices na corveta	76
Figura 4.5 – Esquema da instalação propulsora com a câmara Hyperbar	78
Figura 5.1 – Condições de operação do hélice com dois motores iguais por eixo.....	84
Figura 5.2 – Curvas de resistência ao avanço	88
Figura 5.3 – Curva de potência efetiva para condições de serviço.....	89
Figura 5.4 – Integração casco-hélice-motor para o casco novo.....	94
Figura 5.5 – Diagrama simplificado do sistema de sobrealimentação e gases de descarga do motor	97
Figura 5.6 – Diagrama T-s do ciclo padrão a ar Brayton	97
Figura 5.7 – Curvas características $K_Q - K_T - \eta_o$ do hélice.....	102
Figura 5.8 – Integração casco-hélice.....	111
Figura 5.9 - Integração casco-hélice-motor.....	112
Figura 6.1.- Efeito da diminuição do passo do hélice em relação ao aproveitamento da potência do motor.....	116
Figura 6.2.- Passo para atingir máxima velocidade.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Escala de notas para o uso na matriz de decisão.....	21
Tabela 2.2 – Faixas de operação para o método de Holtrop.....	28
Tabela 2.3 – Variação da rugosidade durante a construção do navio	31
Tabela 2.4 – Medições da rugosidade de navios de diferentes anos de idade	32
Tabela 2.5 – Incremento da rugosidade em serviço	34
Tabela 2.6 - Características principais do navio “ <i>Yayoi-Maru</i> ”.....	35
Tabela 2.7 – Características das incrustações nos testes do navio “ <i>Yayoi-Maru</i> ”.....	36
Tabela 2.8 – Fator de incrustações	37
Tabela 3.1 – Dados de navios semelhantes	61
Tabela 3.2 – Síntese das instalações propulsoras empregadas em corvetas semelhantes a corveta “ <i>Delhim</i> ”.....	64
Tabela 5.1 – Dados principais utilizados para o cálculo da resistência ao avanço (Rt)	86
Tabela 5.2 – Resistência ao avanço e potência efetiva para calado 2,70 m	87
Tabela 5.3 – Resultados do teste do hélice em água aberta	90
Tabela 5.4 – Parâmetros e valores para cálculo da potência da máquina	92
Tabela 5.5 – Características utilizadas para avaliar o desempenho do hélice.....	101
Tabela 5.6 - Resultados do software de aplicação.....	101
Tabela 5.7 – Aumento da potência efetiva por incremento da rugosidade	108
Tabela 6.1 – Resistência ao avanço e potência da máquina para incremento da vida útil do navio.....	115

Tabela 6.2 – Atribuição de pesos aos critérios de comparação.....	123
Tabela 6.3 – Notas para o fator custos.....	124
Tabela 6.4 – Notas para o fator peso da instalação propulsora.....	125
Tabela 6.5 – Notas para o fator consumo específico de combustível.....	125
Tabela 6.6 – Notas para o fator máxima velocidade.....	126
Tabela 6.7 – Notas para o fator menor consumo de potência para velocidade de cruzeiro.....	126
Tabela 6.8 – Notas para o fator facilidades de manutenção	127
Tabela 6.9 – Notas para o fator capacidade de manobra.....	128
Tabela 6.10 – Matriz de decisão.....	128

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área expandida do hélice;
A_o	Área do disco do hélice;
A_p	Área projetada do disco (m^2);
B/T	Relação boca/calado;
C_b	Coefficiente de bloco;
C_f	Coefficiente de resistência de atrito;
C_M	Coefficiente da seção mestre;
C_p	Coefficiente prismático longitudinal;
C_{wp}	Coefficiente de área de linha d'agua;
D	Diámetro do propulsor;
e_h	Eficiência do casco;
e_r	Eficiência relativa rotativa;
e_t	Eficiência de transmissão;
J	Coefficiente de avanço do hélice;
K_Q	Coefficiente de torque do hélice, água aberta;
K_T	Coefficiente de empuxo do hélice ;
L	Comprimento total (m)
L_{WL}	Comprimento na linha d'agua (m);
L/B	Relação comprimento/boca;
n	Número de rotações;
P	Passo geométrico das pás do hélice;
P_A	Pressão atmosférica (kgf/m^2);
P_B	Potência do motor;
P_D	Potência absorvida pelo hélice;
P_E	Potência efetiva do casco;
P_v	Pressão de vaporização de água (kgf/m^2);
Q	Torque absorvido pelo hélice;
R_T	Resistência ao avanço;
S	Superfície molhada (m^2);
t	Coefficiente de redução da força propulsora;
T	Empuxo fornecido pelo hélice;
V	Velocidade da embarcação;
V_A	Velocidade de avanço;
V_r	Velocidade resultante em $r=0,7$ da pá (m/s);
w	Coefficiente de esteira efetiva;
Z	Número de pás de um hélice;
η_o	Eficiência do propulsor em água aberta;
η_p	Coefficiente quase-propulsiva;
r_c	Coefficiente de carregamento;
$\sigma_{0,7R}$	Índice de cavitação.

RESUMO

Este trabalho está relacionado com o estudo da instalação propulsora de uma corveta e tem dois objetivos principais. O primeiro é fazer uma avaliação do projeto da instalação propulsora original e de seu desempenho atual. O segundo é estabelecer algumas diretrizes para o projeto de reforma da instalação propulsora, de forma a garantir que o navio desenvolva a sua capacidade operativa.

Para isto, o trabalho apresenta inicialmente conhecimentos teóricos que servem como fundamento para realizar o estudo, utilizados principalmente na avaliação da instalação propulsora.

São mostrados, como elementos de referência, as características gerais que identificam aos navios militares, bem como, os tipos de instalações propulsoras que eles utilizam, fazendo ênfase em navios tipo corveta. São apontados, em seguida, os requisitos de missão da corveta "Delfim", e é feita a descrição da sua instalação propulsora, original e modificada, com a inclusão da câmara hyperbar, bem como de seu desempenho atual.

A parte principal do trabalho consiste na avaliação do projeto e do desempenho da instalação propulsora da corveta "Delfim". Para o projeto é examinado o tipo de instalação propulsora escolhido, é avaliada a potência instalada, a seleção do conjunto propulsor e o efeito da descarga de gases submarina. Para analisar o desempenho da instalação propulsora é realizado um exame das condições de acoplamento, avaliadas as consequências do uso da câmara hyperbar, os efeitos do incremento da rugosidade do casco do navio e examinado o comportamento da instalação propulsora para diferentes condições de operação. Desta forma, é possível identificar os problemas existentes e propor alternativas de solução.

As alternativas são divididas em três grupos de soluções, sob a premissa de satisfazer determinados requisitos, para depois serem identificadas e submetidas a avaliação através de fatores de comparação. Para a seleção da melhor alternativa é aplicado o método da matriz de decisão.

ABSTRACT

This work (paper) is related to the study of the propulsion system of a corvette ship type and has two main goals. The first objective is to evaluate the original installation design and its current performance. The second objective is to establish directives for the improvement of the propulsion system, in order to ensure that the vessel will develop its operational capabilities.

First, this paper will introduce the theoretical fundamentals needed for achieving those goals. This theoretical basis is used mainly in evaluating the propulsion system.

The general characteristics that identify military vessels and the different kinds of propulsion systems are shown as a reference, with stress on the corvettes class. Following this description of military vessels, the requirements of the "Delfin" corvette mission, and a description of its propulsion system, both original and improved with the inclusion of the hyperbar chamber, as well as its present performance are presented.

The main section of the work consists in evaluating the project and the actual performance of corvette "Delfin" propulsion system. In order to evaluate the project different items are examined: the type of propulsion system chosen, the installed power base, the selection of the propelling set, and the effect of the discharge of underwater gas. In order to evaluate the performance of the propulsion system the following items were examined: the coupling conditions, the consequences of using the hyperbar chamber, the effects of increasing the hull roughness and the behavior of propulsion system for different operational conditions. In this way, it is possible to identify the existing problems and propose alternatives for solving them.

The proposed solutions are split in three groups. This split is based on the assumptions of satisfying specific requirements. Based on those groups the solutions are identified and evaluated using comparison factors. Finally, in order to select the best proposed solution, the decision matrix method is used.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O planisfério nos mostra que 73 % da superfície da terra é coberta por água. Oceanos, mares separam os continentes e, ao mesmo tempo, servem como meio de comunicação entre países. Em termos econômicos, segundo Branch (1996), o mar é de extrema importância, pois constitui uma estrada para o transporte marítimo que representa, entre os diversos modos, a melhor relação custo/benefício.

O mar também é uma inesgotável fonte de alimentação rica em proteínas e os peixes marinhos encerram enormes recursos minerais. O fato das plataformas continentais e zonas econômicas exclusivas (ZEE) estarem sendo delimitadas pelos países que possuem fronteira marítima, como mencionado por Cabral (1980), é uma clara indicação da importância econômica do mar, hoje e no futuro.

O ambiente marinho foi cenário de muitas guerras, seja pela importância como fonte de alimentação, como meio de transporte, em função de suas riquezas ou por sua localização estratégica, entre outras características. Nesse sentido, de acordo com Ireland (1987), a proteção do ambiente marinho desde a aparição das primeiras civilizações sempre esteve diretamente relacionada à capacidade naval dos povos. As

potências da antiguidade sabiam que dominando o mar controlavam a economia das regiões por ele banhadas. Por isso eles tornaram-se hábeis construtores de navios e o mar Mediterrâneo, centro de seu mundo, passou a ser uma grande via de comunicações, além de um campo de batalhas. Egípcios, Cretenses, Fenícios, Gregos e Cartagineses, cada qual por sua vez, tiveram a supremacia dos mares, viajando sempre mais longe e assim ampliando o conhecimento humano.

No mundo moderno, como indicado nos “Fundamentos Doutrinários da Escola Superior de Guerra” (1998), o Poder Marítimo constitui o potencial representado pelo conjunto de meios e recursos utilizados por uma nação, para assegurar o domínio do mar. Desta forma, o Poder Marítimo é formado por uma soma de componentes, tais como a marinha mercante, portos e bases navais, posição geográfica, potencial industrial, capacidade econômica de uma nação e pela Marinha de Guerra que constitui o Poder Naval de um país. Nesse sentido, pode-se afirmar que os navios de guerra conformam o elemento principal do Poder Naval.

O navio de guerra, como mencionado por Fonseca (1989), é basicamente um navio usado por um país para proteger seus interesses e impedir ao inimigo o uso das águas territoriais, bem como conseguir seus objetivos contra os de outro país no caso de conflito. Atualmente, os navios de guerra tem progredido muito, sendo fácil visualizar navios com multiplicidade de funções e sistemas de imenso potencial destrutivo.

O navio de guerra é projetado atendendo a diversos requisitos de missão, impostos pela autoridade naval e característicos em navios militares, tais como, capacidade ofensiva, capacidade defensiva, autonomia, raio de ação, tempo de reação ante ameaças e velocidade. A velocidade depende, entre outros fatores, da potência da instalação propulsora; ela permite ao navio evitar ou procurar o combate conforme a sua conveniência e, neste último caso, escolher a posição mais favorável para o emprego do armamento. Portanto, a instalação propulsora é muito importante para que o navio consiga esta mobilidade.

É por isso que uma questão de grande relevância no desenvolvimento do projeto de um navio, sobretudo de um navio de guerra, é a definição da instalação propulsora. Para cada tipo de embarcação e para cada tipo de atividade existem diversas alternativas potenciais e há diversos aspectos a serem considerados. Desta forma, fica difícil identificar qual sistema irá atender melhor as necessidades. Não basta somente analisar se um sistema é capaz, ou não, de atender os critérios de velocidade e potência, mas deve-se examinar a interação de todas as características num conjunto harmonioso sistema/embarcação. Para cada tipo de navio, haverá a necessidade de se conhecer os aspectos e requisitos que poderão influenciar a escolha do melhor sistema para a propulsão.

Precisamente, o problema particular deste trabalho concentra-se na reforma da instalação propulsora de um navio de guerra tipo corveta, classe “Delim”, construído na década de oitenta nos estaleiros da “Fincaantieri” na Itália, e que encontra-se atualmente em serviço. O navio apresenta deficiências na sua instalação propulsora que conduzem a uma limitação da sua capacidade operativa.

Em princípio, existem diversas alternativas possíveis para reformar a instalação propulsora deste navio. Como a escolha precisa ser feita considerando todos os aspectos técnicos e económicos envolvidos no projeto e operação do navio, é necessário avaliar o projeto e o desempenho da instalação propulsora atual, a fim de conhecer as deficiências, propor as alternativas de solução e, levando em conta os requisitos operacionais do navio, fazer a seleção da melhor opção.

É preciso considerar na avaliação do desempenho do navio que, com o passar do tempo, isto é, anos de serviço, o navio apresenta uma queda de desempenho, redução da potência fornecida ou redução da velocidade, devido à deterioração da superfície das pás do hélice, à rugosidade do casco e às incrustações.

Cabe mencionar, que a vida útil projetada de um navio é de 25 anos e atualmente o navio em questão tem 22 anos de serviço. Pode-se afirmar que, se existe interesse em manter este navio operante, está na hora de se proceder à sua

modernização. E, neste caso, convém rever o projeto da instalação propulsora, embora este sistema, bem como o projeto geral do casco, sejam menos sensíveis ao avanço da tecnologia que os sistemas eletrônicos.

Nesse sentido, está sendo examinada a possibilidade de, nos próximos anos, submeter a corveta a uma modernização de meia-vida e adaptá-la com sistemas compatíveis aos navios mais recentes. Devido às deficiências observadas na instalação propulsora e ao efeito do tempo de serviço destes equipamentos, é conveniente aproveitar esta modernização para reformar a instalação propulsora e recuperar sua capacidade operativa.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem diferentes opções para a instalação propulsora de um navio. Algumas delas têm uma maior aplicação em navios mercantes enquanto que outras estão praticamente restritas a embarcações de fins militares. Deve-se considerar que uma instalação propulsora é constituída pela associação de uma máquina principal, um sistema de transmissão e um elemento propulsor. Assim, uma diversidade de possíveis arranjos para a instalação propulsora podem ser considerados.

Por isso, é importante conhecer as alternativas que podem ser utilizadas, tanto no que diz respeito às opções de máquinas principais, como mencionado nos trabalhos de Brinati, H. (1979), Harrington (1992) e Martin's Marine Engineering Page (2002), como de elementos propulsores, Carlton (1997), Gerr (1999) e Marine Engineering Review (novembro 1999).

No que se refere à máquina principal existem as seguintes opções : turbina a vapor, turbina a gás, motor diesel de baixa rotação, motor diesel de média e alta rotação, motores elétricos, instalações combinadas e propulsão nuclear.

Quanto ao meio de propulsão pode-se utilizar hélice de passo fixo, hélice de passo controlável, hélice azimutal ou propulsor a jato. Embora o hélice de passo fixo

seja o propulsor mais utilizado, a aplicação do hélice de passo controlável tem crescido significativamente. Este tipo de propulsor proporciona uma grande flexibilidade de manobra que é uma característica fundamental em certos tipos de navios, como por exemplo os navios militares.

Em relação ao número de eixos (hélices), como mencionado nos trabalhos de Brinati, H. (1979) e Slade (1999), de modo geral, quanto menor o número de hélices, maior a eficiência e a simplicidade da instalação propulsora. Assim em navios de potência moderada e projeto convencional, utiliza-se normalmente um único hélice. Com isto consegue-se uma eficiência maior do que com dois hélices devido a dois fatores, coeficiente propulsivo e consumo específico. Além disso, simplifica-se a instalação da maquinaria e economiza-se em peso da instalação propulsora. É por isso que a maioria de navios mercantes têm somente um propulsor. Todavia, nem sempre pode ser utilizado um único hélice. Restrições como diâmetro, cavitação, manobrável e vulnerabilidade do navio podem fazer inconveniente a utilização de um hélice.

Nos navios de grande potência propulsiva, são necessários dois, três ou quatro hélices, porque o diâmetro das pás não pode ser grande demais. Incrementando-se o número de propulsores pode-se empregar máquinas propulsoras de menor porte, diminuindo-se a possibilidade do navio ficar à matroca por avaria no equipamento propulsor e aumenta-se a facilidade de manobra. É por isso que a maioria de navios de guerra utiliza de dois a quatro propulsores.

Ao longo do último século, alguns tipos de instalações exerceram uma supremacia na propulsão de navios. Até a década de 60, instalações a vapor, no início com o emprego de máquinas alternativas, depois com a turbina, constituíram o principal tipo de propulsão. Depois, especialmente para navios mercantes, veio a predominância das instalações diesel principalmente devido a sua alta eficiência térmica, uso de combustível barato e menor espaço a ocupar. No caso dos navios de guerra, devido à sua necessidade de operar em distintas velocidades, com diferentes

requisitos de potência, geralmente são utilizadas instalações propulsoras combinadas que, normalmente, envolvem dois tipos diferentes de máquina principal.

A potência instalada depende das características que o navio deve apresentar para cumprir seus objetivos. Um navio deve ser projetado para satisfazer os requisitos estabelecidos.

Para uma melhor compreensão dos requisitos específicos de um navio militar é importante conhecer as suas particularidades. Fonseca (1989) destaca as qualidades técnicas essenciais e náuticas de todo navio, bem como as qualidades militares de um navio de guerra que caracterizam seu poder combatente. Mulligan; Courts (1998) e Galante (2000) apresentam em seus trabalhos os requisitos operacionais típicos para um navio de guerra tipo corveta.

No caso de projeto do navio, segundo Riva (1980), definem-se os requisitos do armador e as condições da rota para o desenvolvimento do projeto em seu primeiro estágio. Os requisitos do armador, que para o caso de navios militares são dados pelo Estado Maior da Armada, compõem o conjunto dos requisitos de operação do navio, apresentado pelo seu proprietário, que inclui os tipos de missões desejados, a região de operação, tonelagem de carga a ser transportada, velocidades de operação, tipo de acomodação, autonomia, etc. As condições de operação implicam na pesquisa dos fatores físicos atuantes na região de trabalho do navio, como estado do mar, profundidades, existência de canais e outros fatores que possam penalizar as condições de operação do navio em sua missão.

Um perfeito conhecimento destes itens, corresponde à definição de uma família de requisitos que devem ser obedecidos pelo navio quando em operação. Tal discriminação de requisitos operacionais é definida como perfil de missão.

De posse das características do perfil da missão torna-se essencial o estabelecimento de uma metodologia de projeto, que facilite ao projetista uma forma de julgamento entre uma família de soluções alternativas. A metodologia de projeto é

aplicada sobre o perfil da missão incorporada às condições de julgamento ou figuras de mérito.

No “Simpósio sobre o projeto das corvetas de 1900 toneladas da Marinha” (Rio de Janeiro 1983), indica-se que para o projeto de construção das corvetas classe “Inhama”, a Marinha Brasileira decidiu implantar um procedimento de projeto baseado naquele utilizado pela Marinha dos Estados Unidos, composto de 4 fases principais : concepção, projeto preliminar, projeto de contrato e de construção.

Calogare (1984) menciona que a fase de concepção de um navio de guerra é constituída de estudos de viabilidade e projeto de concepção. Os estudos de viabilidade apresentam uma estimativa de várias soluções que atendem aos requisitos exigidos pelo Estado Maior da Armada, listando características principais, ou faixas permitidas para cada uma delas. No projeto de concepção são desenvolvidos um ou alguns dos estudos escolhidos, para análise mais profunda e para geração e seleção de solução otimizada, de acordo com figuras de mérito escolhidas, permitindo uma visão mais completa e fundamentada a respeito do navio, além de melhorar um pouco a precisão das características básicas alcançadas.

Selecionadas as configurações dos principais sistemas do navio, é iniciada a fase do projeto preliminar aonde o projeto ganha corpo, buscando-se um dimensionamento ótimo de todos os subsistemas do navio. Concluído o projeto preliminar, desenvolve-se a fase do projeto de contrato cujo objetivo primordial é o detalhamento do projeto do navio em todos os seus aspectos, da estrutura ao sistema de armas, a um nível que permita ao estaleiro construtor estimar com bastante precisão o custo da construção. É baseado na especificação de contrato, produto síntese da fase do projeto de contrato, que o estaleiro prepara sua proposta de preços. Assinado o contrato com o estaleiro segue-se a fase de construção que inclui, no caso de ser um primeiro navio de uma série, uma sub-fase de avaliação operacional.

Para conseguir um ótimo desempenho do navio durante seu serviço, é importante considerar que, com o passar do tempo, seu desempenho varia, o que

exige, portanto, uma estimativa correta das margens de serviço. Erro na estimativa das margens produz sobrecarga da máquina propulsora.

Towsin et al. (1980 - 1981) e Kresic; Haskelil (1983) apresentam em seus trabalhos uma análise sobre a influência da rugosidade do casco, da superfície do hélice e dos fatores ambientais na variação do desempenho do navio. O incremento da resistência à propulsão ao longo da vida do navio como função da rugosidade do casco e das incrustações, bem como a estimativa da perda de eficiência em água aberta do hélice como resultado da deterioração da superfície das pás e das incrustações, são analisados e calculados. Além disso, mudanças nos coeficientes propulsivos como função da rugosidade e dos fatores ambientais são discutidas.

Selecionar e projetar o propulsor mais adequado para uma determinada embarcação não é tarefa simples. Devem ser levados em conta todos os parâmetros pertinentes para se chegar a um propulsor adequado para cada caso.

No caso dos navios de guerra, que precisam de um bom controle na sua faixa de velocidades e manobrabilidade, o hélice de passo controlável é o propulsor mais adequado. Basicamente, a vantagem encontra-se em sempre se poder ajustar o regime de rotação do motor, não interessando as condições de velocidade ou resistência do navio. Entretanto, devido a possíveis falhas do operador, é sempre interessante a elaboração de um programa passo-injeção de combustível que cubra a maioria das condições de operação do navio. Cabe mencionar que nos projetos atuais de instalações propulsoras, que são dotadas de um sofisticado sistema de controle, o uso de hélice de passo controlável permite utilizar da melhor forma as capacidades da instalação propulsora, seja em termos de eficiência em regime permanente, seja em termos de rapidez e segurança para manobras de mudança de velocidade (aceleração e parada brusca). Gerr (1999) apresenta uma descrição deste propulsor, os tipos existentes e como selecioná-lo. Kasten (2001) mostra as vantagens e desvantagens de um hélice de passo controlável em relação a um hélice de passo fixo.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal do trabalho é selecionar a melhor alternativa de solução para reformar a instalação propulsora de um navio de guerra tipo corveta. A reforma precisa ser efetuada porque a instalação atual apresenta problemas que limitam a capacidade operativa do navio.

Para tanto, no desenvolvimento do estudo será analisado o projeto original e a modificação feita ao projeto após a prova de mar, assim como será avaliado o desempenho atual da instalação propulsora para determinar exatamente os problemas existentes e identificar as correspondentes soluções.

Desta forma será possível identificar várias possibilidades para realizar a reforma, as quais serão examinadas levando em conta o perfil da missão e as diferentes potências que usa o navio, para assim, aplicando o método da Matriz de Decisão, selecionar a melhor alternativa.

Como esta próxima a modernização de meia vida do navio, a solução apresentada neste trabalho pode ser analisada mais amplamente e apertefiçada com a finalidade de ser considerada entre as alternativas cogitadas para reformar a instalação propulsora da corveta.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido, além deste capítulo introdutório, da forma apresentada a seguir :

O capítulo 2 faz uma abordagem sobre as considerações gerais que devem ser levadas em conta no projeto de uma instalação propulsora, assim como faz uma revisão dos principais fundamentos e conceitos teóricos que serão utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, principalmente no capítulo 5 para fazer a avaliação

do projeto e desempenho da instalação propulsora da corveta "Delim" bem como no capítulo 6 para o procedimento de seleção da melhor alternativa de solução.

O capítulo 3 faz uma abordagem sobre os navios de guerra, identificando as principais características específicas das embarcações militares e os tipos e características das instalações propulsoras comumente utilizadas por eles. São apresentadas também tabelas com levantamento de dados de navios semelhantes à corveta "Delim", com o intuito de conhecer as diversas concepções de instalações propulsoras utilizadas nesta classe de navio e o tipo mais utilizado.

No capítulo 4 faz-se uma apresentação dos requisitos da missão da corveta "Delim" e mostra-se as suas dimensões e características principais. Também é apresentada uma descrição da instalação propulsora original com os equipamentos principais, da modificação feita após a prova de mar, incluindo a câmara hyperbar, e do desempenho atual da instalação propulsora.

No capítulo 5 faz-se uma avaliação da instalação propulsora atual através da avaliação do projeto do navio e da análise de desempenho da instalação propulsora. Inicialmente, examina-se o tipo de instalação propulsora instalada no navio, depois, calcula-se a resistência ao avanço, o requisito de potência do projeto do navio e avalia-se a potência instalada, para, em seguida, analisar a seleção do conjunto propulsor. Avalia-se também a influência da descarga de gases submarinos no desempenho do motor. Calcula-se a potência requerida do hélice durante o acoplamento e compara-se com a potência entregue pelo motor nesta condição. Examina-se as consequências do uso da câmara hyperbar em relação ao consumo de combustível, bem como dos efeitos de deterioração do casco sobre o desempenho da instalação propulsora. Finalmente, apresenta-se uma análise do desempenho da instalação propulsora para diferentes condições de operação através da utilização de um procedimento gráfico.

O capítulo 6 se ocupa da seleção da instalação propulsora para fazer a reforma do sistema atual. Inicialmente, é discutido o projeto da nova instalação

propulsora, para, em seguida, apresentar as alternativas propostas para solucionar as deficiências da instalação propulsora da corveta, os critérios de comparação utilizados, bem como a análise e seleção da melhor alternativa utilizando o método da “Matriz de Decisão”.

Finalmente, no capítulo 7 apresenta-se uma síntese do trabalho, as conclusões e recomendações para realizar uma análise mais detalhada da solução apresentada, de tal forma que possa ser utilizada como elemento de referência na reforma da instalação propulsora.

É importante estabelecer as condições para as quais a instalação propulsora de um navio deve ser projetada. Assim, é preciso definir as condições de projeto do hélice e as características para a escolha do sistema de propulsão.

2.1 PROJETO DE INSTALAÇÃO PROPULSORA

No presente capítulo apresenta-se conceitos que serviram como fundamento teórico para o desenvolvimento do trabalho, principalmente para a avaliação da instalação propulsora. Inicialmente são apresentadas as considerações que devem ser levadas em conta durante o projeto do hélice, para depois, indicar as características gerais das instalações propulsoras e o procedimento usado neste trabalho para fazer a seleção da melhor alternativa de solução para reformar a instalação propulsora atual. Em seguida, mostra-se o procedimento para calcular a potência instalada do navio, bem como explica-se o método de Holtop, utilizado no capítulo 5, para calcular a resistência ao avanço. Apresenta-se depois os efeitos de deterioração do casco e do hélice sobre o desempenho da instalação propulsora. Finalmente, é ilustrado o procedimento utilizado para fazer a integração casco-hélice-motor.

CAPÍTULO 2

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PROJETO DE INSTALAÇÃO PROPULSORA

Deseja-se naturalmente que o navio satisfaça os requisitos estipulados pelo armador. Portanto, deve-se projetar o hélice no sentido de otimizar sua eficiência para as condições de serviço: velocidade V_s em condições médias de casco e mar.

De uma maneira geral, deve-se projetar o hélice com o máximo diâmetro permitível e otimizar a rotação. Isto, entretanto nem sempre é possível; há casos em que a transmissão de potência da máquina propulsora ao hélice é direta e a rotação do hélice fica condicionada à rotação da máquina. Neste caso, fixa-se a rotação do propulsor e otimiza-se o seu diâmetro.

Quando se projeta o hélice, não se pode ignorar o problema de cavitação. Pode ocorrer que o hélice, que apresenta teoricamente a maior eficiência, de acordo com os diagramas de série sistemáticas, não desenvolva o empuxo desejado por estar trabalhando em regime de cavitação. Isto é possível pois o ensaio de água aberta não fornece elementos para a análise deste problema. Portanto, deve-se garantir que nas condições de projeto o hélice não apresente problemas de cavitação.

Uma das formas mais práticas de se prever problemas relacionados com a cavitação é a utilização do diagrama de Burril, apresentado no trabalho de Burril; Emerson (1962), baseado em dezenas de ensaios em túneis de cavitação de hélices de geometrias variadas. O diagrama de Burril, mostrado na figura 2.1, confronta o coeficiente de carregamento relacionado com pressões presentes nas pás (τ_c) e o índice de cavitação relativo à velocidade resultante na seção a $r/R = 0,70$ das pás ($C_{0,7R}$). Tanto τ_c como $C_{0,7R}$ levam em conta as componentes rotacional e axial das velocidades nas pás do hélice.

O coeficiente de carregamento é definido como :

$$\tau_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_p \quad (2.1)$$

onde :

A_p é a área projetada das pás, dado por :

em que P/D é a razão passo/diâmetro;

$$A_p = A_e (1,067 - 0,229 \cdot P/D) \quad (2.2)$$

V_R é a velocidade resultante a 0,7 do raio da pá; dado por :

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0,7 \cdot \pi \cdot n \cdot D)^2} \quad (2.3)$$

O índice de cavitação é definido por :

$$\sigma_{0,7R} = \frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2} \quad (2.4)$$

onde : $p_o - p_v$ é a pressão no centro do hélice em kN/m^2 .

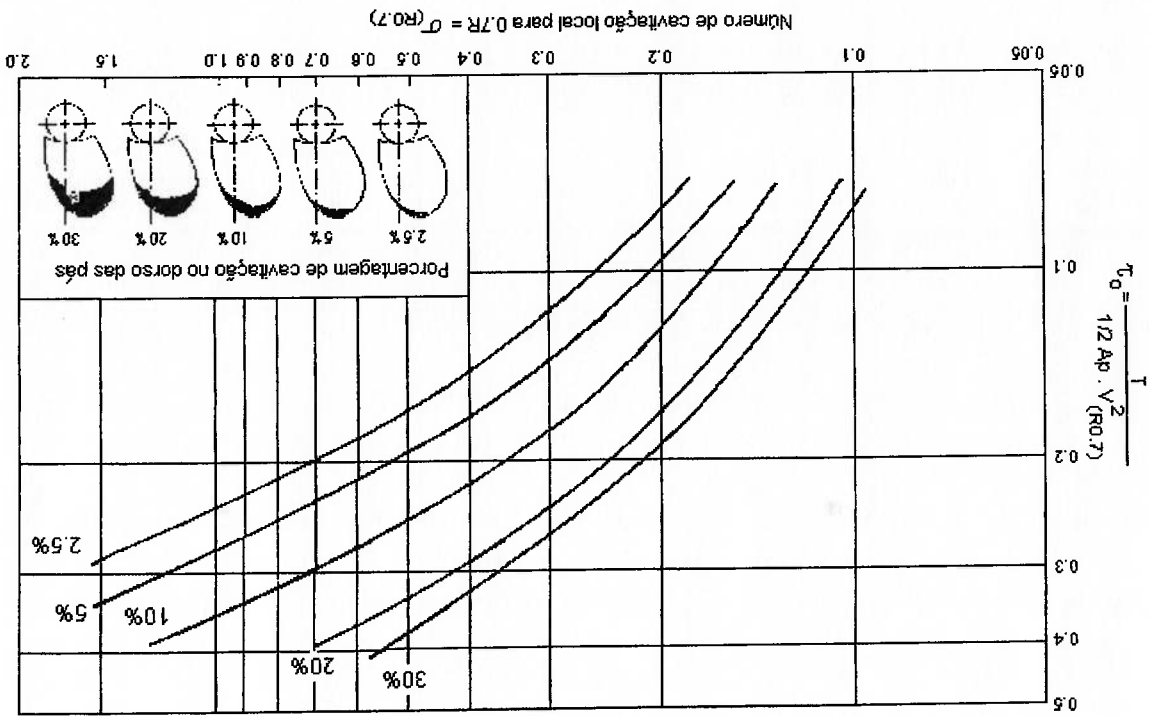


Figura 2.1 – Diagrama de Burril para previsão de cavitação

Neste diagrama um conjunto de curvas definem as regiões em que ocorrem fenômenos de cavitação com diferentes níveis de intensidade - porcentagem da área do dorso das pás cobertas por cavitação.

Apesar de ser um método empírico, que apresenta informações quanto ao comportamento médio aproximado dos hélices, a prática tem demonstrado que seus resultados são confiáveis.

Uma vez selecionado o hélice (eficiência do propulsor determinada) e conhecendo-se os outros termos do coeficiente propulsivo (eficiências do casco, de transmissão e relativa rotativa), esta definida a potência da máquina (P_B), necessária para atender o requisito de velocidade do navio em condições médias de casco e mar.

Diversas características influenciam a escolha do tipo de instalação propulsora que pode ser utilizado em um navio; no entanto, é importante conhecer os mais significativos. Na seguinte seção serão explicadas algumas destas características.

2.2 PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Em engenharia frequentemente, é necessário tomar decisões na condução de um projeto, seja porque existe conflito entre os requisitos que devem ser atendidos, seja porque existem diversas alternativas que satisfazem com alguma aproximação o conjunto de requisitos fixados. Nestas circunstâncias é necessário que o engenheiro disponha de procedimentos que o auxiliem na tomada de decisão.

Quando uma escolha precisa ser feita levando em consideração diversos fatores, não é simples definir a melhor alternativa. Em geral, não existe uma alternativa que seja melhor de acordo com todos os aspectos.

É esta a situação que ocorre na escolha da instalação propulsora de um navio. Há um conjunto de fatores que influem no dimensionamento, desempenho econômico, segurança e conforto do navio. Apresenta-se, a seguir, uma descrição dessas características das instalações propulsoras.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS INSTALAÇÕES PROPULSORAS

Diferentes fatores afetam a seleção do sistema propulsor que pode ser empregado em um navio. Para cada tipo de embarcação, a influência destas características é maior ou menor dependendo das particularidades da missão e dos requisitos do armador. Algumas vezes a seleção do tipo de instalação propulsora é influenciada por fatores pessoais intangíveis como a experiência ou preferência pessoal dos proprietários ou operadores do navio. Uma lista dos fatores comumente considerados é apresentada a seguir.

- **Custos** : Este fator é muito importante e possui uma influência significativa. Apesar de ser um fator que muitas vezes inviabiliza o uso de uma determinada instalação propulsora logo na primeira análise, pode algumas vezes ser visto em segundo plano, dependendo de outros fatores prioritários. Por exemplo, as vezes o sistema mais caro é o único que satisfaz às necessidades da embarcação ou da missão.

- **Peso/dimensões** : Tanto o peso como as dimensões da instalação propulsora são fatores de suma importância na escolha de um sistema, pois sua incompatibilidade com a embarcação pode torná-lo inviável logo em sua primeira análise.

A importância do peso da instalação propulsora depende do particular tipo do navio. Em geral, navios de guerra apresentam problemas crônicos de peso. Devido às elevadas potências requeridas para desenvolver altas velocidades procura-se utilizar instalações propulsoras de reduzido peso específico (peso da instalação / potência). Para esses navios durante grande parte da vida útil utiliza-se apenas uma fração da potência instalada.

Entende-se que o peso não pode ser superior à capacidade suportada pela estrutura do navio. Peso excessivo, além de afetar estruturalmente a embarcação, irá gerar também problemas de equilíbrio. Já o volume da instalação propulsora deve ser tal que possibilite o alojamento do sistema e seus acessórios na praça de máquinas.

Percebe-se, então, que esses fatores podem inviabilizar o uso de uma determinada instalação propulsora, se na fase de projeto as dimensões principais não tenham sido definidas para acomodar essas características do sistema (peso e dimensão).

• **Ruído e Vibração** : Os ruídos, de modo geral, são considerados um problema pois afetam a habitabilidade e a detectabilidade do navio; sua influência pode ou não ser significativa, dependendo do tipo de missão do navio ou dos equipamentos que nele operam.

A semelhança dos navios mercantes, o projeto de navios de guerra não pode prescindir, desde suas fases iniciais, da incorporação de medidas de controle do ruído ambiental. As técnicas aplicáveis a ambos casos são essencialmente as mesmas. Nos navios de guerra, todavia, o ruído transmitido para a água deve também ser controlado, a fim de se minimizar a probabilidade de: ativação de minas acústicas, detecção por torpedos com sonar passivo, detecção por sonares passivos de submarinos, e interferência com o sonar ativo do próprio navio, quando existente. Como mencionado no estudo de Skolnik, D. (1991), as duas grandes fontes de ruído nestes navios são os hélices e as máquinas de propulsão e auxiliares, com predomínio destas últimas em baixas velocidades e das primeiras a velocidades maiores.

Existem maneiras de se controlar a emissão e propagação desses ruídos, porém isso acarreta custos adicionais. É preferível, muitas vezes, optar por sistemas menos ruidosos do que gastar com o controle e isolamento dos ruídos. Evidentemente, não basta que o sistema seja silencioso se ele não atender outras demandas essenciais.

• **Consumo de combustível** : Um fator de grande importância na comparação de instalações propulsoras é o consumo específico de combustível, isto é a quantidade de combustível requerida para produzir uma unidade de potência por unidade de tempo. A unidade propulsora é, essencialmente, uma instalação que converte a energia disponível no combustível em trabalho mecânico para acionar o navio. De

uma forma geral, a eficiência térmica varia de um para outro tipo de instalação, resultando em valores diferentes de consumo específico. Cabe mencionar que quanto maior a eficiência térmica menor é o consumo específico de combustível.

Os gastos com óleo combustível representam uma parcela considerável do custo operacional do navio. Em virtude da grande influência dos gastos de combustível sobre o desempenho econômico da instalação propulsora há um grande atrativo por instalações de baixo consumo específico, tanto para navios mercantes como para navios militares. Além de atetar o custo operacional da instalação propulsora, o consumo específico de combustível tem efeito sobre a capacidade de carga e espaço no navio uma vez que, quanto maior o consumo específico, maior deverá ser a capacidade dos tanques para armazenar o combustível. É interessante mencionar que este fator também afeta o raio de ação do navio.

• **Confiabilidade** : De todos os fatores que devem ser considerados na escolha do tipo da maquinaria mais adequada, a confiabilidade em serviço, segundo Brinati, H. (1979), é o de maior importância. Uma avaria na instalação propulsora significa perda de serviço do navio, e se acontece durante operações militares representa um perigo muito alto para a própria embarcação e sua tripulação. As outras características podem parecer importantes nos primeiros estágios de projeto, mais tornam-se de menor importância quando mais tarde comparados com os resultados e irritantes de uma interrupção no serviço do navio. É por isso que geralmente os navios militares, para garantir um nível adequado de redundância, possuem equipamentos alternativos para os diferentes sistemas instalados na embarcação.

• **Controle de velocidade** : A capacidade da instalação propulsora de permitir que o navio opere adequadamente numa larga faixa de velocidade ou, pelo menos, em alguns valores distintos de velocidade pode ser entendida, de uma forma simples, como controle de velocidade. Este fator pode ter maior ou menor importância dependendo do tipo de embarcação. Para a maioria dos navios mercantes existe uma única velocidade de operação. Para embarcações militares, que devem operar em

diferentes velocidades para cumprir sua missão, o controle de velocidade pode tornar-se decisivo na escolha da instalação propulsora.

A variação da velocidade pode ser obtida mesmo com a rotação constante do motor principal. É necessário, para isso, a aplicação de sistemas que permitam reduções, como por exemplo câmbios mecânicos, ou elementos propulsores que permitam a variação do empuxo, como por exemplo os hélices de passo controlável. Logicamente, a instalação propulsora precisa proporcionar meios para atender essa exigência.

• **Manutenção** : No processo de seleção da instalação propulsora devem ser considerados tanto a manutenção preventiva como a corretiva. A manutenção preventiva tem um impacto direto sobre o número de tripulantes e custos operacionais. Se o equipamento instalado requer manutenção preventiva com pequenos intervalos deve-se prover elementos na tripulação para executar essas tarefas.

Manutenção corretiva também deve ser considerada à luz dos requisitos de tripulação (tanto no que diz respeito ao número de elementos quanto à qualificação técnica) materiais e ferramentas. Além do mais, os vários modos de avaria dos equipamentos devem ser estudados, de modo a identificar aqueles modos que mais adversamente afetarão o desempenho da instalação.

A facilidade com que as peças danificadas possam ser obtidas influi sobre o tipo de instalação que deve ser utilizada. Partes da maquinaria que requerem para seu reparo materiais ou processamento altamente especializados ou que, por qualquer razão, são encontrados em poucas fontes, devem ser usados somente onde a probabilidade de avaria é desprezível ou onde as consequências não são importantes.

• **Manobrabilidade** : Para navios, com entradas e saídas frequentes dos portos, operações estas que envolvem muita manobra, é evidente que os mesmos devem ser equipados com maquinaria que assegure a melhor manobrabilidade possível. O

mesmo também é válido para embarcações que navegam em canais, em estreitos ou em regiões cercadas por acidentes geográficos.

A manobrabilidade de um navio não depende apenas do tipo de instalação propulsora, ela é em grande parte determinada pelas características do hélice, características de leme e aparelho de governo, linhas do casco e número de eixos. A influência do tipo de instalação propulsora se restringe ao máximo torque para marcha a ré que ela pode fornecer e ao tempo necessário para atingir o mesmo.

A provisão de meios para a parada e reversão de um navio está diretamente relacionado com o tipo de máquina selecionado. Instalações propulsoras que utilizem motores diesel de baixa rotação ou motores elétricos não apresentam problemas em satisfazer os requisitos de reversão já que essas máquinas são intrinsecamente reversíveis. Motores diesel de alta e média rotação, assim como turbinas a vapor e gás não são reversíveis e requerem um meio especial para satisfazer esta exigência. Em casos onde os requisitos de manobrabilidade são severos, tornou-se comum, segundo Kasten (2001) o emprego de hélices de passo controlável.

2.2.2 MATRIZ DE DECISÃO

Nos textos que tratam sobre teoria de decisão são apresentados diversos métodos para conduzir um projeto à melhor solução. No entanto, o que mais se adequa à proposta de este trabalho é a técnica chamada “Matriz de Decisão”. Esta matriz é composta de linhas e colunas, onde as características ou fatores que influem sobre a instalação propulsora a ser projetada (selecionada) são expressas nas colunas e as opções de escolha nas linhas.

Efetua-se inicialmente uma avaliação da importância relativa de cada uma das características sobre o desempenho do sistema atribuindo-se pesos correspondentes a cada fator. As alternativas são avaliadas recebendo uma nota de acordo com cada um dos aspectos. A opção que obtiver a maior somatória do produto entre as notas e pesos, será a escolhida.

Os critérios de atribuição de notas e pesos que se adota neste procedimento é o de princípio de satisfação percentual de um objeto, exprimido no trabalho de Camilo (2001), e podem ser descritos da seguinte forma :

- **Pesos** : A soma dos pesos atribuídos a todas as características das instalações propulsoras deverá ser igual a “um” (1,0).

- **Notas** : As notas deverão ser expressas de forma percentual, de zero a 100%, e atribuídas segundo a tabela 2.1 para as características não mensuráveis e calculadas de forma algébrica para as características mensuráveis.

Tabela 2.1 – Escala de notas para uso na matriz de decisão

Objetivo satisfeito em todos os aspectos.	Satisfação completa	100%
Objetivo satisfeito em todos os aspectos importantes.	Grande satisfação	90%
Objetivos satisfeitos na maioria dos aspectos.	Considerável satisfação	75%
Um ponto médio entre completa satisfação e não satisfação (também considerado um ponto de incerteza).	Moderada satisfação	50%
Objetivo satisfeito em alguns aspectos, mas com menos da metade dos aspectos.	Menor satisfação	25%
Objetivo satisfeito para uma extensão muito pequena de aspectos.	Mínima satisfação	10%
Objetivo não satisfaz em nenhum aspecto.	Não satisfaz	0%

2.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA INSTALADA

Para o cálculo da potência instalada é necessário considerar as interações casco-hélice e hélice-máquina principal. Na primeira delas determina-se a resistência ao avanço do navio e a potência efetiva.

2.3.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Quando um navio avança em águas calmas, está sujeito a uma força que se contrapõe ao movimento. Essa força é denominada resistência ao avanço e é, basicamente, uma força dissipativa. A resistência ao avanço é função da velocidade, da superfície molhada, das características físicas do fluido e da geometria da embarcação. A resistência, segundo Harvald (1983) é usualmente representada por :

$$R_T = C_T \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (2.5)$$

onde C_T é o coeficiente de resistência total, ρ é a densidade do fluido (água), S é a superfície molhada do casco e V é a velocidade. Ao se deslocar com certa velocidade, o casco dissipa, através da resistência ao avanço, uma potência P_E , denominada potência efetiva, cuja formulação é a seguinte :

$$P_E = R_T \cdot V \quad (2.6)$$

O coeficiente C_T representa a composição de diferentes componentes da resistência ao avanço e que, a despeito de existirem diversas formas de modelamento, pode ser representada, segundo Lewis (1988), pelo seguinte modelo:

$$C_T = C_F + C_R \quad (2.7)$$

O coeficiente de resistência ao avanço, na expressão acima, é composto de duas parcelas que representam, respectivamente, o coeficiente de atrito C_F e o coeficiente de resistência residual C_R , associado à geração de ondas, esteira e à tridimensionalidade do casco. Segundo Sampaio; Russo; Leyda (2002), a parcela residual pode ser considerada como, em uma primeira aproximação, dependente da forma imersa e das dimensões do casco e, portanto, pouco afetada pela rugosidade do casco.

Na seção seguinte apresenta-se uma descrição sucinta do método de Holtrop que será utilizado neste trabalho para estimativa da resistência ao avanço.

2.3.2 RESISTÊNCIA DEVIDO AO VENTO

A parcela devida ao vento depende da forma emersa da embarcação, incluindo a área exposta da superestrutura, e da direção e velocidade do vento; sua influência, entretanto, usualmente é pequena face à sua ordem de grandeza.

2.3.3 COEFICIENTES DE INTERAÇÃO CASCO-HÉLICE

Com a operação do hélice na popa do navio existe uma interação casco-hélice que se manifesta através de dois fenômenos :

- **Aumento da resistência**

Para que o navio mantenha uma velocidade constante é necessário que o propulsor aplique uma força igual, e de sentido contrário, à resistência. Esta força é denominada empuxo (T). Este empuxo fornecido pelo hélice é, entretanto, diferente da resistência total que a embarcação apresenta quando o propulsor não está operando. Essa diferença se deve a presença do hélice modificando o escoamento junto à popa. Este efeito pode ser facilmente entendido supondo-se um corpo totalmente imerso deslocando-se a velocidade constante em um fluido ideal. O escoamento ao longo do corpo acarreta o aparecimento de um campo de pressões com dois pontos de estagnação (proa e popa). A presença do propulsor na região da popa provoca a aceleração do fluido na região circunvizinha e, consequentemente, reduz a componente para vante do campo de pressões. A resistência R_T que ocorre nesta condição tem um valor mais alto e pode ser colocada em função de R_T através de :

$$R_T^- = \frac{R_T}{1 - t} \quad (2.8)$$

onde t é o coeficiente de aumento da resistência que expressa a influência entre o hélice e o casco. Convém ressaltar que, por motivos históricos, t é conhecido como fator de redução da força propulsora.

O empuxo requerido do hélice para manter a velocidade do navio constante é dado por :

$$T = R_T^- = \frac{R_T}{1-t} \quad (2.9)$$

• **Redução da velocidade relativa hélice-fluido**

Ao deslocar o navio, o empuxo fornece potência ao fluido. Essa potência é expressa da seguinte forma:

$$P_T = T \cdot V_A \quad (2.10)$$

onde V_A é a velocidade do escoamento do fluido sobre o propulsor. V_A difere de V pois a presença do casco do navio a frente do hélice cria uma esteira que modifica o escoamento reduzindo a velocidade com que a partícula fluida encontra o disco do propulsor. Essa diferença de velocidade é, em geral, causada pela existência de camada limite e/ou turbulência no escoamento. Pode-se representar esse fenômeno definindo o coeficiente de esteira (w) da seguinte maneira :

$$w = \frac{V - V_A}{V} \quad (2.11)$$

A relação entre a potência dissipada pelo casco e a fornecida pelo propulsor é comumente chamada de eficiência do casco (e_h). A partir das relações (2.6) e (2.10) chega-se a expressão :

$$e_h = \frac{R_T \cdot V}{T \cdot V_A} = \frac{1-t}{1-w} \quad (2.12)$$

Para calcular os valores do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsora (t), será aplicada a fórmula de Schoenherr, conforme apresentado no trabalho de Lewis (1988), mostrada a seguir:

2.3.4 OUTROS COEFICIENTES

- Eficiência relativa rotativa

A eficiência do hélice em água aberta é determinada em ensaio, no qual o propulsor opera isoladamente. Neste ensaio, como mencionado no trabalho de Hirata (1991), o propulsor é imerso na água com um equipamento especial, que permite medir o empuxo e o torque, em determinada rotação e velocidade de avanço do propulsor. Nesta situação é possível definir uma eficiência do hélice dada por :

$$\eta_{po} = \frac{T V_A}{2\pi Q_0 n} \quad (2.15)$$

onde :

T é o empuxo do hélice;

V_A é a velocidade de avanço;

Q₀ é o torque fornecido ao hélice em água aberta;

n é a rotação do hélice.

Quando o hélice opera na popa de uma embarcação, devido a esteira do navio, a eficiência do propulsor não deve ser a mesma, já que o escoamento é diferente. Ou seja, a sua eficiência será dada por:

$$\eta_p = \frac{T V_A}{2\pi Q_n} \quad (2.16)$$

onde Q é o torque do hélice operando na esteira. Pode-se então, definir um coeficiente entre estas duas eficiências que se denomina eficiência relativa rotativa e é dada por:

Este coeficiente pode ser obtido no ensaio de auto-propulsão de modelo reduzido, ou estimado através de fórmulas empíricas. Seu valor, segundo Tornbald (1987), varia entre 0,95 até 1,00 para navios bihélices e entre 1,00 até 1,10 para navios monohélices.

• **Eficiência de transmissão**

A potência produzida no motor da embarcação é transmitida ao propulsor por um eixo. A potência que chega ao propulsor é menor que a fornecida pelo motor pois existem perdas no eixo; essas perdas são causadas pelos mancais e pela dissipação elástica no material do eixo e, quando houver redutor, por perdas no contato entre os dentes das engrenagens. A razão entre a potência entregue ao hélice (P_D) e a fornecida pelo motor (P_B) é chamada de eficiência de transmissão (e_t). Usualmente assume-se que, de acordo com Lewis (1988), a eficiência de transmissão é igual a 0,97 quando o motor está instalado à meia-nau e é igual a 0,98 quando instalado à ré. Se considera-se o fato da instalação propulsora ter ou não ter instalado redutor, os valores da eficiência de transmissão variam entre 0,96 e 0,97 quando tem redutor e entre 0,98 e 0,99 quando não tem.

$$e_t = \frac{P_D}{P_B}$$

(2.18)

2.3.5 POTÊNCIA REQUERIDA DA MÁQUINA

É a potência entregue pela máquina ao eixo necessária para atender o requisito de velocidade do navio em condições médias de casco e mar.

Uma vez obtida a potência efetiva do navio e calculando-se o coeficiente

quase-propulsivo (η_D), que é resultado do produto da eficiência de casco, da eficiência do hélice em água aberta e da eficiência relativa rotativa, pode-se determinar a potência entregue ao hélice utilizando a seguinte formulação :

$$P_D = \frac{P_E}{\eta_D} \quad (2.19)$$

Conhecida a potência entregue ao hélice (P_D) pode-se calcular a potência requerida da máquina (P_B) utilizando a seguinte expressão :

$$P_B = \frac{P_D}{e_t} \quad (2.20)$$

Para navios mercantes a potência instalada é determinada, em geral, a partir dos requisitos fixados pela operação em velocidade de serviço. Para navios de guerra devem ser consideradas as solicitações de potência para outras condições do perfil de missão da embarcação. Elas serão de grande importância na escolha do tipo de instalação propulsora que precisa atender, de forma eficiente, a demanda de potência em diferentes velocidades.

2.4 MÉTODO DE HOLTROP

Holtrop (1978) realizou uma avaliação estatística de modelos e resultados de ensaios, selecionados nos arquivos do NSMB (*"Netherlands Ship Model Basin"*). Utilizaram-se múltiplos métodos de análise de regressão. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma descrição matemática para a resistência dos navios, as propriedades propulsivas e os efeitos de escala entre os modelos e a escala real. A avaliação foi executada a partir dos resultados de 1707 medições de resistência, 1287 medições de propulsão, conduzidas com 147 modelos de navios e dos resultados de 82 medições de ensaios feitas a bordo de 46 novos navios. Este material havia sido utilizado em estudos prévios, enquanto muitas das medições em escala real foram destinadas para o estudo de correlação modelo-navio realizado pela ITCC (*"International Towing Tank Conference"*).

Em 1982 foi novamente reapresentado o método, porque sua precisão foi anteriormente considerada insuficiente. A adaptação deste método resultou numa formulação com uma maior faixa de aplicação, e sua extensão se deu para a melhoria da predição da potência de navios de altos coeficientes de blocos com razões baixas de L/B, e de navios aliados com um complexo arranjo de apêndices e popa "transom" submersa. Algumas partes do estudo foram executadas no NSMB e, no caso de embarcações navais, foi conduzido através da "Royal Netherlands Navy".

Holtrop, em 1984 realizou uma reanálise estatística, já que o método resultou impreciso para o cálculo de resistência para alguns tipos de navios, especialmente para cascos de alta velocidade, em números de Froude acima de 0,5. Com o objetivo de melhorar o método, este foi estendido para faixas de interesse mais amplas. Em extensão dos dados publicados, incluiu-se a série 64, sendo a análise de regressão baseada em provas com 334 modelos.

No presente trabalho, para realizar os cálculos da curva de resistência ao avanço e potência efetiva, será utilizado o programa "Autopower" baseado no método de Holtrop. Para isto, é necessário que o navio a ser estudado encontre-se dentro das faixas de operação do mencionado método, as quais são apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Faixas de operação para o método de Holtrop

HOLTROP		
Parâmetro	Mínimo	Máximo
Fn	----	1,00
Cp	0,55	0,85
B/T	2,10	4,00
L/B	3,90	14,90

2.5 EFEITOS DA DETERIORAÇÃO DO CASCO SOBRE O DESEMPENHO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Para se obter um bom desempenho do navio durante sua vida útil, é necessário estimar corretamente as margens de serviço, para então selecionar o ponto de projeto do propulsor. Falhas na correta estimativa das margens ocasiona sobrecargas da máquina principal durante a vida útil do navio, traduzidas em maiores gastos de manutenção e consumo de combustível.

Os efeitos da rugosidade do casco e hélice, a degradação do motor, a ação do vento, as ondas, são os principais fatores que intervem no incremento da carga da máquina principal. Às vezes, devido a incorretas estimativas desses efeitos, muitos navios têm que efetuar modificações nos sistemas propulsivos, como redução do diâmetro, adaptação do passo ou substituição do propulsor.

As perdas de desempenho devido à deterioração superficial do casco são caracterizadas principalmente por três causas: um aumento contínuo do nível de rugosidade, um intermitente desenvolvimento de incrustações e avarias mecânicas provocadas na superfície do casco pelas contínuas entradas e saídas do cais e por impacto com embarcações que fazem abastecimento de óleo lubrificante, combustível e água.

2.5.1 MÉTODO “BSRA”

A caracterização do estado de conservação de cascos e hélices tem sido baseada somente na medição do nível de rugosidade superficial. As primeiras tentativas no sentido de quantificar o nível de rugosidade de cascos de navios foram desenvolvidas pela BRSA (“*British Ship Research Association*”), ainda na década de 50, baseavam-se no registro de perfis de altura das imperfeições superficiais.

O método padrão BRSA, como tornou-se usualmente conhecido, consiste na determinação da distância vertical máxima observada entre a envoltória das cristas e a dos vales de diversos registros de perfis de rugosidade (≥ 12) de 50 mm de

comprimento, tomadas em um grande número de diferentes pontos do casco (≥ 100). Em cada ponto, a média das distâncias verticais máximas medidas é chamada de amplitude aparente média MAA ("Mean Apparent Amplitude"), como mostrado na figura 2.2.

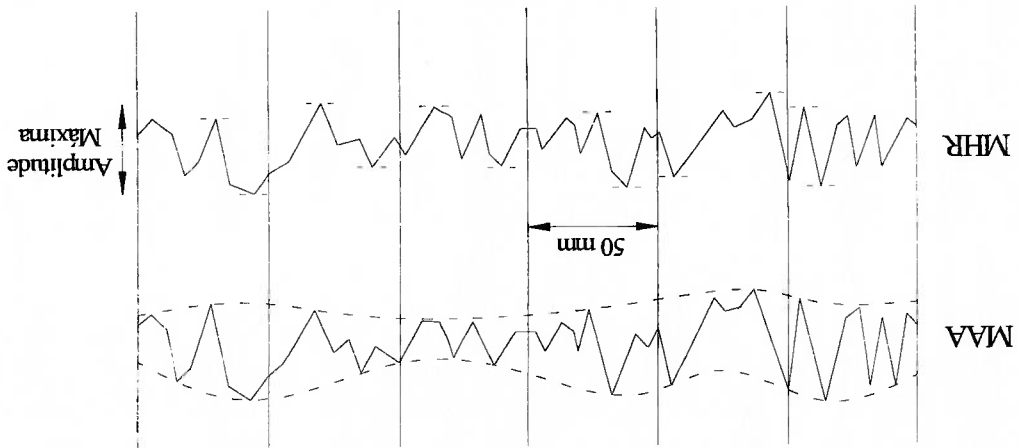


Figura 2.2 – Envolvórias para obtenção dos valores de rugosidade

em MAA e em MHR

Durante muitos anos, as envoltórias das cristas e dos vales foram traçadas à mão livre, sobre registros em papel da topografia da superfície do casco. Somente nos anos 70, com o desenvolvimento de instrumentação apropriada, capaz de fornecer diretamente o valor da amplitude máxima para cada trecho de 50 mm, foi possível eliminar a análise visual das medições. A partir de então, a média aritmética das amplitudes máximas de cada ponto de medição passou a ser designada por rugosidade local média do casco – MHR.

2.5.2 RUGOSIDADE INICIAL DO CASCO

A rugosidade acumulada durante o processo de construção do navio é estimada em termos de MAA, devido à simplicidade e disponibilidade de expressões de correlação entre o nível de rugosidade e o aumento da resistência. Segundo Towsin et al. (1980), a rugosidade pode ser entendida como composta por:

- MAA^{chapa} relativa à qualidade de fabricação do chapamento; esta componente é fixa durante a vida útil do navio, se não ocorrerem mudanças no chapamento; a chapa utilizada nas embarcações possui uma rugosidade da ordem de 50 μm , mas se o aço é tratado incorretamente, esta pode superar os 200 μm ;

- $MAA^{recobrimento}$, relativa às camadas de tintas e proteções, depende do tipo de tinta e/ou proteção utilizada, do método de aplicação adotado e do controle de qualidade efetuado durante as docagens, que podem variar significativamente de estaleiro para estaleiro; o número de camadas aplicadas de cada componente (anti-corrosivos e anti-crustantes) depende do tipo da tinta e do tempo de vida desejado para o recobrimento;

- $MAA^{corrosão}$, relativa ao ataque corrosivo em áreas onde a proteção se tornou insuficiente, e as condições ambientais foram desfavoráveis durante as aplicações das tintas protetoras.

Na tabela 2.3, Towsin et al. (1981), apresenta as medições de rugosidade feitas durante a construção de um navio, incluindo a preparação do chapamento, os vários estágios de pintura e a docagem final de acabamento. Os resultados obtidos ilustram a variação dos níveis de rugosidade antes do lançamento definitivo do navio.

Tabela 2.3 – Variação da rugosidade durante a construção do navio

OPERAÇÃO	AHR (μm)
Preparação do chapamento (jateamento e base)	55
Aplicação de três camadas de anticorrosivo	135
Aplicação de anti-incrustante	160
Acabamento final para entrega	180

Em síntese, o tratamento do aço, a efetividade do jateamento ou técnica de limpeza, as qualidades e texturas das tintas anti-corrosivas e anti-incrustante, a

CONDICÃO		AHR (μm)
Navio novo durante sua construção, colocação da quilha e tinta primer		40 – 60
Navio novo com recobrimientos anti-corrosivo e anti-incrustante		80 – 180
Navio depois de três anos de serviço	melhor 110 pior 350	
Navio depois de seis anos de serviço	melhor 130 pior 650	
Navio depois de quatorze anos de serviço	melhor 380 pior 1100	

Tabela 2.4 – Medições de rugosidade de navios de diferentes anos de idade

As faixas de incremento da rugosidade obtidas de uma amostra de navios, são mostradas por Towsin et al. (1981), na tabela 2.4. Em média, a rugosidade para todos os navios é de aproximadamente 30 $\mu m/ano$, mas alguns navios com tintas especiais e com proteção catódica só atingiram um incremento de 20 $\mu m/ano$. Estas faixas de medidas dependem principalmente da área onde opera a embarcação.

2.5.3 INCREMENTO DA RUGOSIDADE COM A VIDA ÚTIL DO NAVIO

A estimativa é de que a superfície do chapejamento de um navio novo, antes de sua operação, apresente níveis de rugosidade como mostrados na tabela 2.3. Para fins de correção, a ITTC-1978 adotou uma rugosidade de 150 μm para os navios novos que iniciam suas operações. Valores abaixo de 100 μm são encontrados em alguns navios; também foram medidos níveis de rugosidade superiores a 500 μm em navios recém-construídos.

adequação dos procedimentos de aplicação das tintas utilizadas, e as condições ambientais durante suas aplicações são os principais indicativos dos níveis de rugosidade durante a construção.

O incremento da rugosidade do casco não tem uma relação direta com sua idade. Esta falta de correlação pode ser entendida levando em conta os sistemas de recobrimentos e seus desempenhos, a proteção catódica, o número de docagens e a qualidade do trabalho realizado em cada docagem.

- **Mudanças na rugosidade durante as docagens**

Um estudo realizado por Towsin et al (1980), indica que a mudança da rugosidade durante a docagem ($MA^{docagens}$) pode variar, dependendo dos métodos utilizados para a limpeza do casco e aplicação das tintas, influenciando também as condições ambientais durante a realização dos trabalhos e limitações de espaço de estaleiro para executar os mesmos. O incremento médio da rugosidade adotado pela ITTC – 1978 por cada docagem realizada pela embarcação é 14 μm .

- **Incremento da rugosidade em serviço**

Em serviço, o aumento da rugosidade do casco ($MA^{serviço}$) é causado principalmente pela ocorrência de falhas na pintura, sendo as mais comuns a perda da efetividade das proteções anti-corrosiva e anti-incrustante e a ocorrência dos fenômenos de descascamento e escamação. A rugosidade devida à corrosão e ao desenvolvimento de incrustações varia em função do tempo e do desempenho das respectivas proteções aplicadas. As tintas anti-corrosivas podem se mostrar ineficientes em certas regiões do casco após um determinado período de tempo, ocasionando o aparecimento dos fenômenos de ponteamo e craqueamento. Fatores análogos induzem o aparecimento de incrustações, dentre os quais os mais significativos têm origem nos danos causados à pintura do casco pelas avarias mecânicas ocorridas em serviço.

As principais causas de elevação da rugosidade em serviço são:

- Corrosão do chapameento, função do tipo de proteção catódica e do desempenho da pintura anti-corrosiva.

- Falha de proteção aplicada, ocasionando principalmente a escamação e/ou descascamento da tinta.

- Utilização de anti-incrustante de baixo desempenho ou inadequado, favorecendo a ocorrência de falhas.

- Avarias mecânicas causadas à superfície da tinta por choques com amarras e âncoras, docagens, encalhes, operação no gelo, etc.

Na tabela 2.5, Towsin et al. (1980), apresenta o incremento da rugosidade em condições de serviço.

Tabela 2.5 – Incremento da rugosidade em serviço

Valor médio	+2,8µm/mês
Casco com alto nível de rugosidade antes da docagem	+4,3µm/mês
Casco com baixo nível de rugosidade antes da docagem	+1,9µm/mês
Casco recobertos com tintas especiais ("self polishing copolimers") (esta razão depende da rugosidade inicial do casco)	-3,1µm/mês

Em um dos poucos trabalhos sobre o tema, Kan et al. (1958), desenvolveu um extenso programa de testes experimentais com um navio real sobre a influência das incrustações da superfície do casco na resistência ao avanço. Os testes foram realizados com um navio escola de pequeno porte, de nome "Yayoi-Maru", cujas principais características são mostradas na tabela 2.6.

As investigações dos efeitos da incrustação sobre a resistência ao avanço do casco foram conduzidas através de testes de reboque. As medições foram realizadas ao longo de um período de pouco mais de um ano, tempo no qual o navio permaneceu ancorado durante os intervalos entre testes. Observou-se que, nestes testes, as cracas aumentavam no casco.

Tabela 2.6 – Características principais do navio “Yayoi-Maru”

Comprimento total	19,90 m
Boca	4,30 m
Calado	1,90 m
Coefficiente de bloco	0,540
Coefficiente prismático	0,584
Coefficiente de seção mestra	0,925
Superfície molhada	95,00 m ²
Deslocamento	78,60 ton.

Os resultados dos testes, apresentados na figura 2.3 e na tabela 2.7, mostram que a permanência do navio atracado ou fundeado em porto por longos períodos de tempo, favorece o surgimento de incrustações que podem aumentar a resistência ao avanço em quantidades significativas da ordem de 60 a 100%.

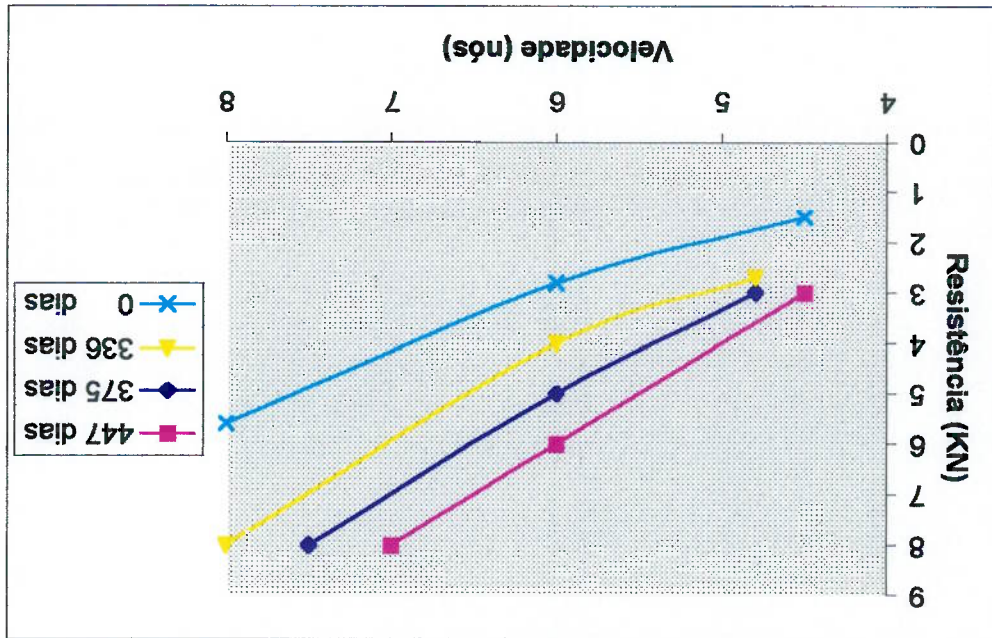


Figura 2.3 – Influência das incrustações na resistência ao avanço nos testes do navio “Yayoi-Maru”

Tabela 2.7 – Características das incrustações nos testes do navio “Yayoi-Maru”

Período	Posição de Medida	Diâmetro Médio (mm)	MAA (µm)
336 dias	Costado	6	200
	Fundo	5	200
375 dias	Costado	10	500
	Fundo	17	800
447 dias	Costado	12	900
	Fundo	14	1000

• Cálculo do incremento da rugosidade por incrustações

Segundo Kresic; Haskel (1983), a componente da rugosidade devida às incrustações, $MAA_{fouling}$, é composta por:

$$MAA(\text{custados}) = \text{HRF}(\text{PT})(\text{CEFF}) \quad (2.21)$$

$$MAA(\text{fundo}) = 0,75(\text{HRF})(\text{PT})(\text{CEFF}) \quad (2.22)$$

onde:

HRF é o fator de incrustações por dia em porto (tabela 2.8);

PT são os dias em porto;

CEFF é o fator de efetividade do recobrimento anti-incrustante; dado

por:

$$CEFF = 1 - \left(2,72 \frac{e^z}{z} - 0,24(Z - 1)^{0,263} \right) \quad (2.23)$$

Z é a razão entre o tempo decorrido desde a última aplicação e a vida efetiva do anti-incrustante.

Tabela 2.8 – Fator de incrustações

ESTADO DO "FOULING"	HRF (µm/dia)
LIMPO	0,00
TRAÇOS	$5,334 \times 10^{-4}$
TRAÇO PARA LEVE	$7,849 \times 10^{-3}$
LEVE	$3,828 \times 10^{-2}$
LEVE PARA MODERADO	0,1178
MODERADO	0,2822
MODERADO PARA SEVERO	0,5755
SEVERO	1,052

Como mencionado no trabalho de Malone; Little; Allman (1980), o fator CEFF mostrado em (2.23) pode ser igual a zero durante a vida efetiva do anti-incrustante, quando não tenha havido acumulação de incrustações. Uma vez passada a sua vida efetiva, o valor de CEFF se incrementa rapidamente até um valor máximo de 1,0 o que implica que o anti-incrustante já não impede o crescimento de incrustações. O anti-incrustante geralmente perde toda sua efetividade quando supera um lapso igual ao dobro de sua vida efetiva.

A seguinte expressão é recomendada pela ITTC-1978 para prever o incremento da resistência total por efeito da rugosidade do casco :

$$\Delta C_f = \left[105 \left(\frac{MAA}{L_{WL}} \right)^{0,33} - 0,64 \right] * 10^{-3} \quad (2.24)$$

onde :

ΔC_f é o coeficiente de margem de resistência devido à rugosidade;

MAA é a amplitude aparente média total, que é igual à somatória de:

$[(MAA_{chapa} + MAA_{recobrimentos} + MAA_{corrosão})_{inicial} + MAA_{fouling} + MAA_{docagens} + MAA_{serviço}]$;

L_{WL} é o comprimento da linha d'água em metros.

O coeficiente de incremento de potência efetiva é dado por:

$$C_s = \Delta C_{F\text{total}} - \Delta C_{F\text{inicial}} (150\mu\text{m}) \quad (2.25)$$

onde :

$\Delta C_{F\text{total}}$ é o coeficiente de margem de resistência devido à rugosidade para MAA total;

$\Delta C_{F\text{inicial}}$ é o coeficiente de margem de resistência devido à rugosidade para MAA = 150 μm ;

Com o resultado da expressão (2.25), pode-se calcular o incremento de potência efetiva devido à rugosidade do casco por :

$$P_{E\text{rugosidade}} = \frac{\rho S C_S (0,5144V)^3}{150} \quad (2.26)$$

onde :

ρ é a densidade da água ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$);

S é a superfície molhada (m^2);

V é a velocidade do navio (nós).

2.5.4 APERFEIÇOAMENTOS NA PROTEÇÃO DO CASCO

O efeito das incrustações pode ser limitado pela utilização de tintas anti-crustantes de alto desempenho, cuja efetividade pode alcançar, dependendo das circunstâncias, períodos de até 36 meses.

Outros esforços tem sido empregados no sentido de reduzir os efeitos da utilização dos chamados copolimeros de auto-polimento SPC (“*Self Polishing Copolimers*”). Estes compostos possuem, além da característica de impedir o

desenvolvimento de incrustações, a capacidade de propiciar uma redução do nível de rugosidade após a entrada em serviço. Este efeito é obtido através do atrito da água com o casco em movimento, o que, em função de suas propriedades, provoca o polimento da superfície, e a consequente diminuição do nível de rugosidade.

2.6 PERDAS NA EFICIÊNCIA DO HÉLICE

A rugosidade da superfície tem dois efeitos sobre a eficiência do propulsor; em relação a um propulsor com superfície lisa verifica-se que o aumento da força de arrasto nas pás do hélice com rugosidade causa aumento do coeficiente de torque; também ocorre uma redução da força de sustentação e, por consequência, do coeficiente de empuxo para um dado ângulo de incidência do escoamento.

Em termos dos coeficientes de empuxo (K_T), de torque (K_Q), e do coeficiente de avanço (J), a eficiência de um hélice, para uma superfície “hidrodinamicamente lisa”, é :

$$\eta_{po} = \frac{K_{T1}}{J} \cdot \frac{K_{Q1}}{2\pi} \quad (2.27)$$

Os coeficientes de empuxo (K_T), de torque (K_Q), e de avanço (J), são definidos abaixo. D é o diâmetro do hélice e o subscrito “1” refere-se à condição de “hélice liso”.

$$K_{T1} = \frac{\rho n^2 D^4}{T} \quad (2.28)$$

$$K_{Q1} = \frac{\rho n^2 D^5}{Q_0} \quad (2.29)$$

$$J = \frac{V_A}{n D} \quad (2.30)$$

As variações dos coeficientes de torque e empuxo do propulsor em provas de mar e em condições de serviço podem ser estimadas em função da rugosidade das pás do propulsor pelas seguintes expressões :

$$K_{T2} = K_{T1} - \Delta K_{TD} - \Delta K_{TL} \quad (2.31)$$

$$K_{Q2} = K_{Q1} - \Delta K_{QD} - \Delta K_{QL} \quad (2.32)$$

onde K_{T1} , K_{Q1} , K_{T2} , K_{Q2} são os coeficientes de empuxo e torque para as condições de provas e serviço respectivamente; os subscritos D e L indicam as parcelas de correção respectivas à alteração do arrasto e da força de sustentação das pás nos coeficientes de empuxo e de torque. Kresic, Haskelil (1983) apresentaram formulações para estimar as parcelas de ajuste nos coeficientes de empuxo e de torque devido à rugosidade das pás do hélice.

Existe uma tendência de perda de eficiência do propulsor mesmo para uma pequena variação da rugosidade, como mostra a figura 2.4.

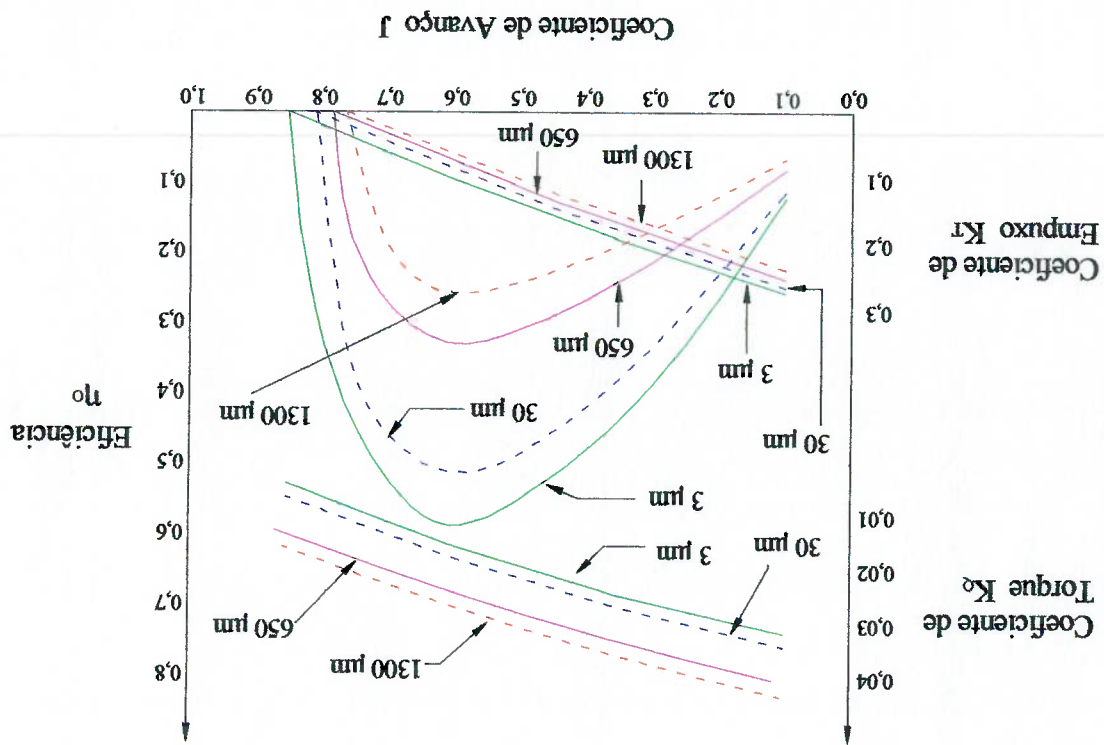


Figura 2.4 – Variação de K_T , K_Q , e η_0 com a rugosidade

Como ilustrado na figura acima, apresentada no trabalho de Kresic; Haskeil (1983), um incremento de 27 μm de rugosidade para um propulsor novo da classe "S" de 3 μm , reduz a eficiência do propulsor em água aberta em 5,5%, o que corresponde a uma perda de 0,19% de eficiência por cada 1 μm de amplitude de rugosidade. Quando a rugosidade é alta e há incrustações, a amplitude média aparente de rugosidade da pá do propulsor atinge valores entre 650 e 1300 μm . As perdas de eficiência do propulsor para uma variação de rugosidade de 650 até 1300 μm geram 9,9% de perda de eficiência, isto correspondendo a uma perda de aproximadamente 0,02% na eficiência por cada 1 μm de amplitude de rugosidade. Assim, a taxa de perda de eficiência é perto de 14,3 vezes menor para um propulsor pesadamente incrustado em relação a um propulsor novo. Daí, a importância de se manter o propulsor limpo e de prover um programa de manutenção regular para evitar grandes perdas de eficiência.

Como foi descrito anteriormente, existem basicamente dois tipos de rugosidade, uma devida a imperfeições na superfície e outra a incrustações. A superfície rugosa do hélice pode ser facilmente medida antes e após a docagem, de uma maneira similar àquela usada para medições da rugosidade do casco. As incrustações podem ser expressas em amplitude média aparente equivalente em microns. A ITTC-1978 propõe uma rugosidade na pá de 30 μm para propulsor em prova de mar. A rugosidade média para um propulsor novo baseado nas normas ISO ("International Standard Organization") é entre 3 e 10 μm , dependendo da qualidade de fabricação. No entanto, durante o tempo que o navio permanece amarrado ao cais para realizar os trabalhos de acabamento, o propulsor adquire uma rugosidade adicional, perto de 20 μm , resultando um acumulado de 30 μm antes de o navio realizar a prova de mar.

Em serviço, o incremento de rugosidade varia de propulsor para propulsor. Foi admitido pela ITTC-1978, e apresentado no estudo de Kresic; Haskeil (1983), que a deterioração do propulsor causaria um incremento de 20 μm por ano. Durante os trabalhos de docagem, realiza-se uma limpeza do propulsor, considerando-se uma diminuição da ordem de 10 μm por cada docagem efetuada. Quando se considera que

um propulsor é submetido a um polimento, a quantidade de rugosidade diminui consideravelmente, até 40 μm , deixando o propulsor praticamente liso, com a mesma rugosidade inicial. A variação da rugosidade devida às incrustações é admitida ser um terço da rugosidade total antes que o navio realize a docagem.

Em geral, a magnitude das perdas de eficiência do hélice, que resultam dos fatores anteriormente mencionados, são de grande importância para o análise do sistema motor-hélice e, portanto, devem ser consideradas para evitar sobrecarga do motor.

2.7 EFEITOS DA RUGOSIDADE DO CASCO NOS COEFICIENTES DE INTERAÇÃO CASCO-HÉLICE

A variação no coeficiente de esteira efetivo é função de mudança nas condições de fluxo nas pás do hélice na popa do navio. A deterioração da superfície do casco e as incrustações estão constantemente alterando as condições de fluxo ao redor do hélice. Fatores ambientais tais como ventos e ondas, assim como manobra da embarcação, estão também mudando as características de resistência do navio, o qual resulta finalmente na redução da velocidade do navio. Todos estes fatores têm uma influência significativa na esteira e na configuração da distribuição de esteira desde os ensaios até as condições de serviço.

Não existem, porém, resultados de ensaios em modelos reduzidos para estudar a diferença no coeficiente de esteira efetivo entre dois intervalos de docagens. Mas, ensaios realizados em escala real com um navio de 20 metros de comprimento, no Japão, dão uma clara indicação do comportamento da esteira nominal como uma função do tempo entre duas docagens. Os resultados destes ensaios mostram que o coeficiente de esteira médio nominal (W_m) cresceu quase linearmente desde o primeiro dia depois de repintar o casco, de um valor de 0,3 até um valor de 0,56 depois de 450 dias de exposição a incrustações. O incremento quase linear do coeficiente de esteira nominal, como uma função do número de dias

de incrustações, é uma indicação que uma tendência similar pode ser esperada com o coeficiente de esteira efetivo.

Para estimar as mudanças no coeficiente de esteira efetivo entre dois períodos de docagens utilizara-se uma versão modificada da fórmula do ITCC-1978 para predição da esteira em escala real. A formulação original é a seguinte :

$$W_{TS} = (t + 0,04) + (W_{TM} - t - 0,04) \frac{(1+k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k)C_{FM}} \quad (2.33)$$

onde :

W_{TS} é o coeficiente de esteira para escala real;

W_{TM} é o coeficiente de esteira para o modelo;

t é o coef. de redução da força propulsora para modelo e navio;

0,04 é o coeficiente para levar em conta o efeito do leme;

k é o fator de forma;

C_{FS} é o coeficiente de resistência de atrito do navio, ITTC-1957;

C_{FM} é o coeficiente de atrito do modelo, ITTC-1957;

ΔC_F é o coeficiente de margem de resistência devido a rugosidade.

Como a finalidade é lidar com mudanças devido à rugosidade em serviço e

não com efeito de escala, o coeficiente de esteira em escala real (W_{TS}) pode ser usado para representar o coeficiente de esteira em serviço e o coeficiente de esteira do

modelo (W_{TM}) para representar o coeficiente de esteira em ensaio. E também

admitido que o coeficiente de resistência de atrito do navio não muda em serviço e, portanto, é sempre igual ao coeficiente de resistência de atrito em ensaios. O

coeficiente de margem de resistência devido a rugosidade (ΔC_F) representa agora a diferença em rugosidade entre o ensaio e as condições de serviço. O coeficiente de

0,04, que na fórmula original tomou em consideração o efeito do leme nos ensaios quando comparado com o modelo, pode ser agora eliminado desde que seja admitido

que o efeito do leme para os ensaios e para o serviço é idêntico. Admite-se também

que o fator de forma (k) é também o mesmo para os ensaios e para as condições de serviço. Com estas modificações, pode-se reescrever a expressão (2.33) :

$$W_{T \text{ serviço}} = t + (W_{T \text{ ensaios}} - t) \left(1 + \frac{C_S}{C_F \text{ ensaios}} (1+k) \right) \quad (2.34)$$

onde :

$W_{T \text{ serviço}}$ é o coeficiente de esteira em serviço;

$W_{T \text{ ensaios}}$ é o coeficiente de esteira em ensaios;

$$C_S = \Delta C_{F \text{ serviço}} - \Delta C_{F \text{ ensaios}} \quad (2.35)$$

$$\Delta C_{F \text{ ensaios}} = \left[105 \left(\frac{LWL}{150 \times 10^{-6}} \right)^{1/3} - 0,64 \right] \times 10^{-3} \quad (2.36)$$

$$\Delta C_{F \text{ serviço}} = \left[105 \left(\frac{LWL}{MAAS} \right)^{1/3} - 0,64 \right] \times 10^{-3} \quad (2.37)$$

onde :

$C_{F \text{ ensaios}}$ é o coeficiente de resistência de atrito em ensaios ITTC;

MAAS é a amplitude média aparente em serviço.

Admite-se que o coeficiente de redução da força propulsora seja o mesmo para ensaios e para condição de serviço. Há uma relação entre o coeficiente de esteira e o coeficiente de redução da força propulsora, mas, ensaios conduzidos em modelos e navios em escala real tem mostrado que o coeficiente de redução da força propulsora permanece quase constante para cada condição de rugosidade, apesar do incremento do coeficiente de esteira devido à rugosidade.

A eficiência do casco (e_h) é função do coeficiente de redução da força propulsora (t) e do coeficiente de esteira (w) como visto em (2.12).

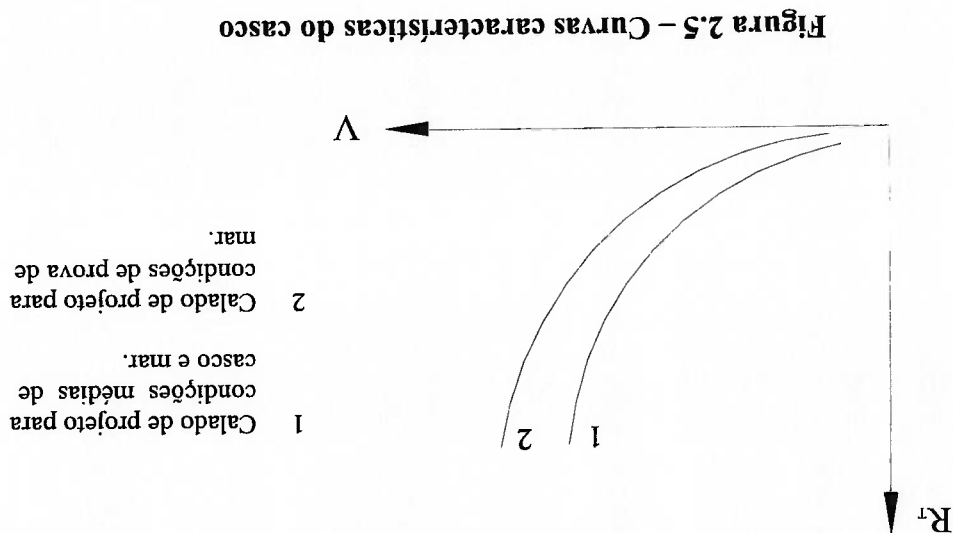
Como mencionado acima, o coeficiente de esteira (w) aumenta devido à rugosidade enquanto, o coeficiente de redução da força propulsora (t) permanece quase constante. Portanto, a eficiência do casco (e_h) tende a aumentar com o incremento da rugosidade.

2.8 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Para compreender o comportamento do sistema propulsor em diferentes condições de operação é preciso analisar o problema da integração casco-hélice-motor. Assim é possível conhecer como uma alteração das características de algum destes elementos influi sobre os outros. Para fazer a integração são precisas as equações do movimento do sistema. Os diversos termos que aparecem nas equações devem ser colocados como função das variáveis independentes. Dado que é difícil obter estas funções de forma explícita, e que se deseja apenas soluções das equações para regime permanente, é empregado um procedimento gráfico que utiliza as curvas características dos elementos envolvidos na integração, conforme é apresentado no trabalho de Brinati, H. (1979).

2.8.1 CURVA CARACTERÍSTICA DO CASCO

É a curvas de resistência em função da velocidade como mostra a figura 2.5.



2.8.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE

As curvas características de um hélice são, usualmente, apresentadas na forma de parâmetros adimensionais tais como K_T , K_Q e J . A figura 2.6 mostra as curvas do coeficiente de empuxo (K_T) e do coeficiente de torque do propulsor (K_Q) em função do coeficiente de avanço (J), para um hélice de passo fixo e uma dada razão de área expandida.

As curvas características do hélice em sua forma adimensional não são convenientes para o propósito deste estudo. Uma vez que o objetivo é efetuar a integração motor-hélice-casco, é interessante que os elementos envolvidos sejam representados por curvas que possam ser colocadas em um mesmo gráfico. No que diz respeito à integração casco-hélice, verificou-se que o casco é representado pela curva de resistência em função da velocidade. Portanto, é razoável que se procure empregar curvas características do hélice na forma de empuxo em função da velocidade. Para determinação destas curvas pode-se partir da curva do coeficiente de empuxo em função do coeficiente de avanço.

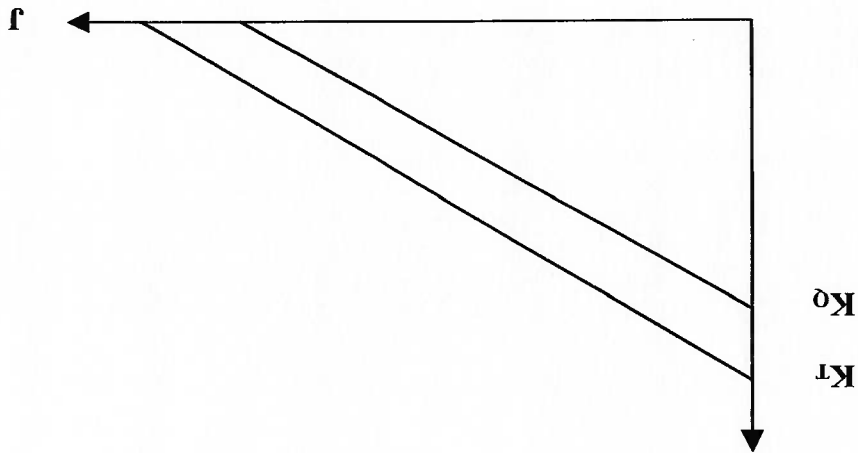


Figura 2.6 – Curvas características $K_T (J)$ e $K_Q (J)$ para um hélice de passo fixo

A figura 2.7 apresenta a passagem do gráfico K_T vs J ao gráfico das curvas do empuxo do hélice T em função da velocidade de avanço V_A parametrizadas em n , rotação do hélice.

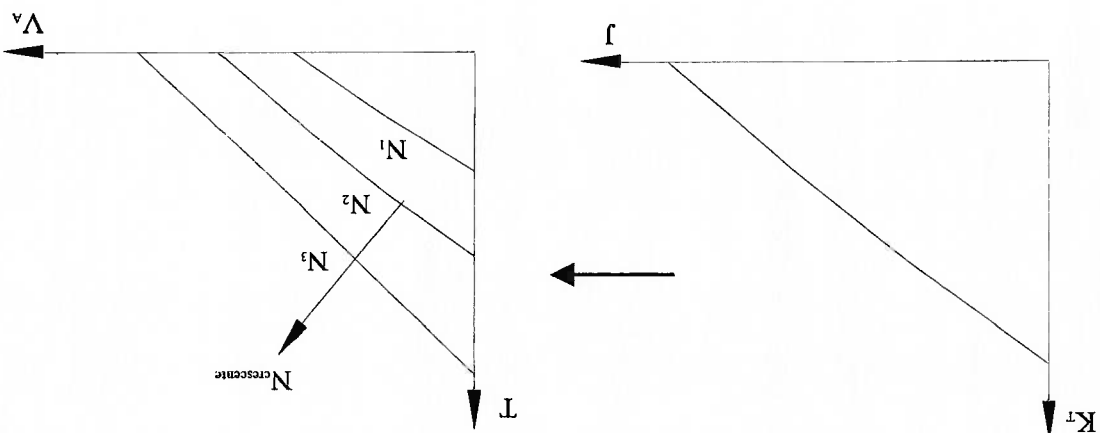


Figura 2.7 – Modificação da curva característica de empuxo da hélice

É mostrada, a seguir, a determinação de uma curva $T = f(V_A)^n = cte$, para ilustrar o processo. Assim, fixa-se uma rotação de trabalho n_1 . Na curva $K_T(j)$ do hélice a cada ponto corresponde um par de valores do coeficiente de empuxo K_T e do coeficiente de avanço j . Porém, como estão fixados os valores do diâmetro do hélice (D) , da rotação (n) , e da densidade do fluido (ρ) , 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 $K_T = f(j)$, se uma função é linear a outra também será.

Para ilustrar isto, utiliza-se a função $K_T = f(j)$. Usando as expressões 2.28 e 2.30 obtêm-se :

$$(2.38) \quad \frac{T}{\rho n^2 D^4} = f \left(\frac{n D}{V_A} \right)$$

$$(2.39) \quad T = \rho n^2 D^4 f \left(\frac{n D}{V_A} \right)$$

Como foi mencionado, ρ , n e D são constantes; portanto obtêm-se :

$$T = f'(V_A)^{n=cte} \tag{2.40}$$

Repetindo-se o processo para diferentes valores da rotação do hélice, pode-se transportar para o novo gráfico todas as informações contidas no diagrama $K_T = f(j)$.

Um procedimento semelhante ao descrito acima é utilizado para uma representação mais conveniente das características do torque do hélice. A figura 2.8 mostra a modificação que é efetuada na curva $K_Q(j)$ do hélice, para efeito de integração com o motor.

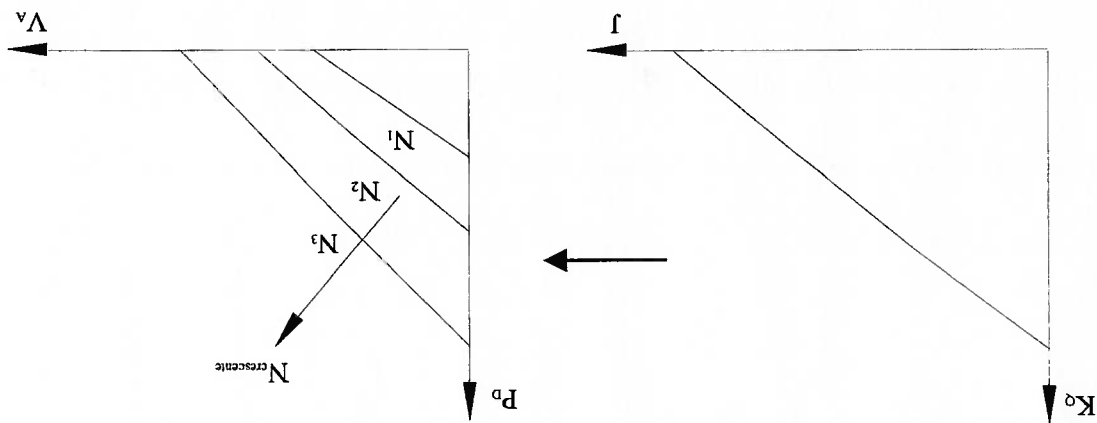


Figura 2.8 – Modificação da curva característica do coeficiente de torque do hélice

O método de conversão de um gráfico para outro é análogo ao descrito anteriormente para o empuxo. Fixada uma rotação n_1 , um ponto no gráfico K_Q vs j corresponde a uma certa velocidade V_A e um certo torque Q . Porém, para o presente objetivo é mais interessante introduzir uma função que represente não o torque, mas se a potência absorvida pelo propulsor. Se multiplica-se o torque por 2π vezes a rotação n , obtém-se a potência absorvida ou entregue ao hélice (P_D).

De igual forma como foi feito com a curva de empuxo, pode-se mostrar que a função $P_D = g'(V_A)^{n=cte}$ tem o mesmo aspecto da função $K_Q = g(j)$. Substituindo esta função pelas expressões 2.29 e 2.30 obtém-se :

$$\frac{\tilde{Q}}{D^2} = g \left(\frac{nD}{V^A} \right) \quad (2.41)$$

$$\tilde{Q} = (D n^2 D^5) g \left(\frac{nD}{V^A} \right) \quad (2.42)$$

$$P_D = (2\pi D^3 D^5) g \left(\frac{nD}{V^A} \right) \quad (2.43)$$

Como p , n e D são constantes, obtêm-se :

$$P_D = g' (V^A)^{n=cte} \quad (2.44)$$

2.8.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

Para o motor, normalmente se dispõe de curvas de potência em função da rotação para diversos regimes de carga, ou seja, para diferentes posições do controle das bombas injetoras. Geralmente especificam-se curvas de potência de máxima, intermitente e de potência máxima. A figura 2.9 mostra as curvas características do motor.

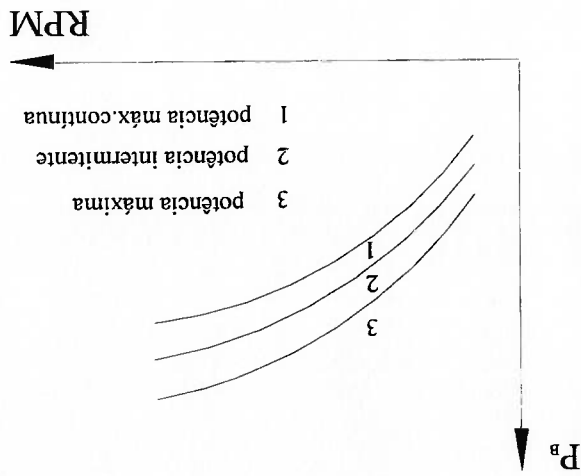


Figura 2.9 – Curvas características do motor

2.8.4 PROCEDIMENTO PARA INTEGRAÇÃO CASCO-HELICE-MOTOR

O procedimento adotado compõe-se de duas etapas. Primeiro, coloca-se em um mesmo gráfico as curvas de resistência ao avanço contra velocidade para o navio (casco) e de empuxo líquido contra velocidade para o hélice. Aqui é necessário efetuar duas transformações de variáveis: $V = V_A(I-w)$ e $T^* = T(I-t)$, em que T^* é chamado de empuxo líquido. Desta forma, é possível construir o gráfico da figura 2.10.

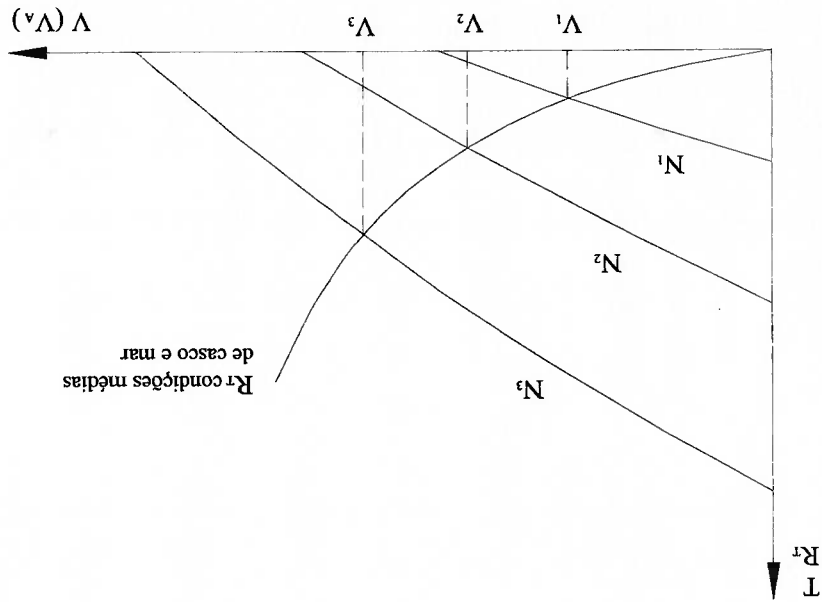
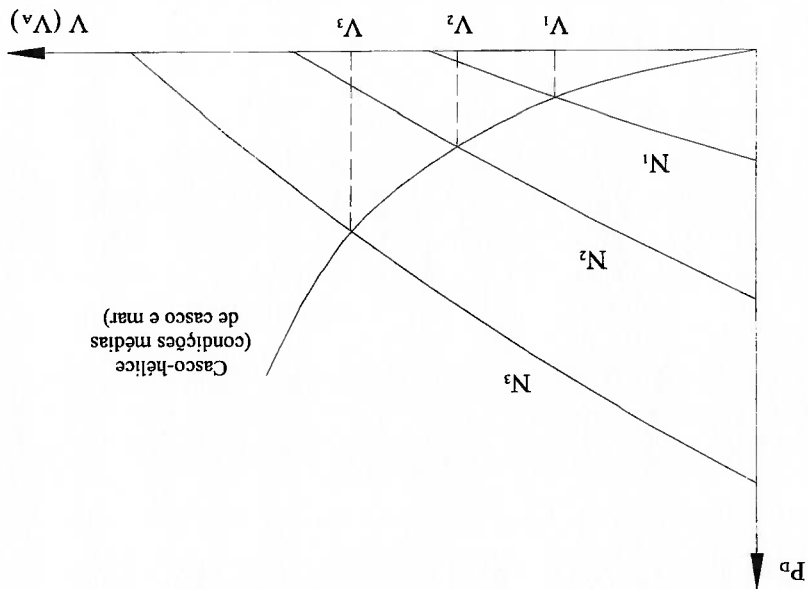


Figura 2.10 – Integração casco-hélice

A figura 2.10 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. Portanto, precisa-se 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 2.11, as informações obtidas nessa integração. Efetua-se, neste caso uma alteração de escala, colocando a potência requerida em função da velocidade do navio.

Figura 2.11 – Curva de potência requerida para o conjunto casco-hélice



Para fazer a integração do conjunto casco-hélice com o motor é desenhada no gráfico da figura 2.12 a curva de potência fornecida pelo motor e sua limitação de rotação. Para se plotar estas duas curvas no mesmo gráfico é preciso dividir a potência requerida pela eficiência de transmissão (e_t), ou seja a potência é expressa em termos de P_B requerida.

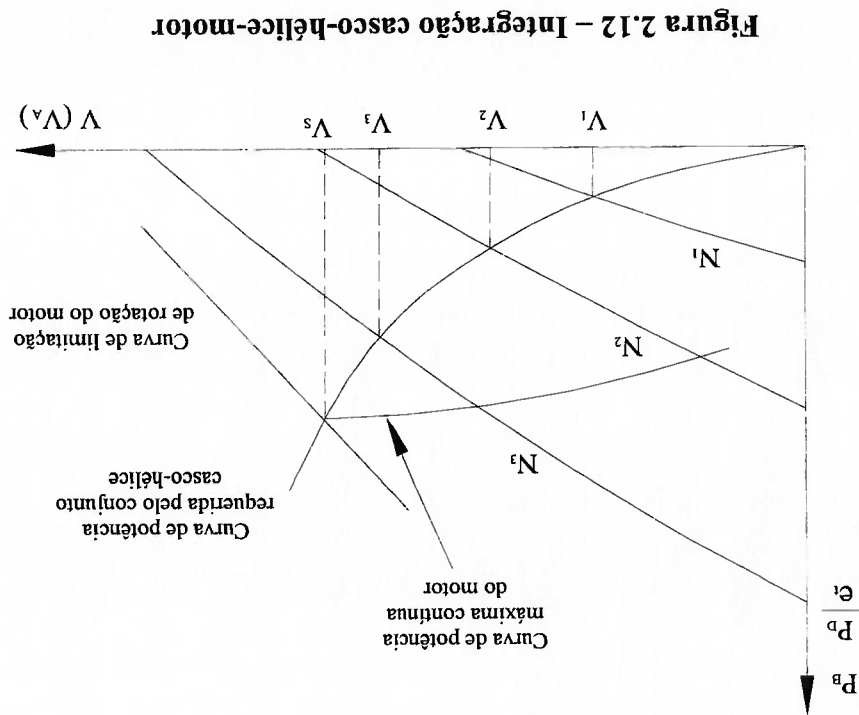


Figura 2.12 – Integração casco-hélice-motor

Qualquer que seja o seu tipo, ou o meio de propulsão, um navio deve possuir como qualidades técnicas essenciais a solidez de sua estrutura, a flutuabilidade e a estanqueidade, e como qualidades náuticas a resistência mínima à propulsão, a manobrabilidade e a estabilidade.

Como mencionado por Fonseca (1989), os navios de guerra adicionalmente devem possuir as seguintes qualidades que caracterizam seu poder combatente :

- **Potência ofensiva** : compreende as armas empregadas para causar dano ao inimigo. É avaliada pelo número e alcance de seus mísseis, pelo número e calibre dos canhões, pelo número e tipo dos aviões e/ou helicópteros que pode transportar, pelo número e espécie dos torpedos, minas, bombas de profundidade, lança-foguetes e pelo número dos homens e material que podem desembarcar na praia. Ou seja a potência ofensiva é dada pelo sofisticado e variado de seu armamento, assim como por seu poder destrutivo.
- **Proteção** : compreende os dispositivos empregados para neutralizar ou reduzir ao mínimo os efeitos das armas inimigas, e, com outros fatores como a velocidade, define a capacidade defensiva do navio. É medido pelo armamento defensivo (contra mísseis, aviões, torpedos), sistemas de contramedidas eletrônicas, espessura do casco que protege as partes vitais do navio, pelos arranjos estruturais destinados a reduzir as consequências de um alagamento e pela eficiência do sistema de controle de avarias para controlar as avarias causadas por um ataque inimigo.

- **Mobilidade** : é função da velocidade e do raio de ação, que dependem da capacidade da instalação propulsora, de seu consumo específico e do volume dos tanques de combustível do navio. A mobilidade consiste na facilidade do navio em alcançar melhor posição em relação aos navios inimigos, para usar o seu armamento mais eficientemente, seja em ofensiva, seja em retirada. A mobilidade, como ficou definida acima, só é satisfatória com o funcionamento eficiente do Centro de Informações de Combate (CIC) que é

um órgão que colhe todas as informações dos radares, aparelhos de escuta, vigias visuais, encarregados de armamento, de máquinas, de comunicações, de controle de avarias, etc., e as seleciona, dando ao comandante o resumo da situação, pelo qual este decidirá como movimentar o navio para empregar a melhor ofensiva ou a mais conveniente defensiva.

- **Autonomia** : é a capacidade de permanecer no mar por longos períodos de tempo. É determinada pelo raio de ação, a capacidade de água doce e de mantimentos, inclusive câmaras frigoríficas.

Outra característica típica dos navios de guerra são as formas de seus cascos. O projeto geral do casco vem sendo modificado para diminuir as assinaturas de radar, infravermelho e acústica. Também existe uma tendência para o uso de materiais mais leves na estrutura do casco. Apesar do uso de alumínio ter sido descartado para as superestruturas dos cascos, que continuam compostas basicamente de aço, como indica em seu estudo Forbes; Judd (1997), vem sendo utilizado atualmente o *Kvelar* para adicionar blindagem ao casco sem o aumento de deslocamento significativo do navio. As modificações das linhas gerais do navio, para não refletir as ondas de radar, estão sendo de tal ordem que em breve ficarão irreconhecíveis em face aos antigos navios.

Como mencionado no “Simposio sobre o projeto das corvetas de 1900 toneladas da Marinha” (1983), a configuração do sistema de propulsão de um navio de guerra bem como as características dos acionadores, das redutoras e das linhas de eixo, apresentam diferenças significativas quando comparadas aos sistemas de propulsão de navios mercantes. Requisitos especiais de projeto, como mínimo ruído, resistência a choque e vibrações, alta velocidade e mínimo peso, associados com a restrição de espaço, são os fatores responsáveis por estas diferenças. A figura 3.1 mostra, como exemplo, alguns efeitos dos requisitos de desempenho das corvetas classe “Inhama” sobre o projeto de sua instalação propulsora.

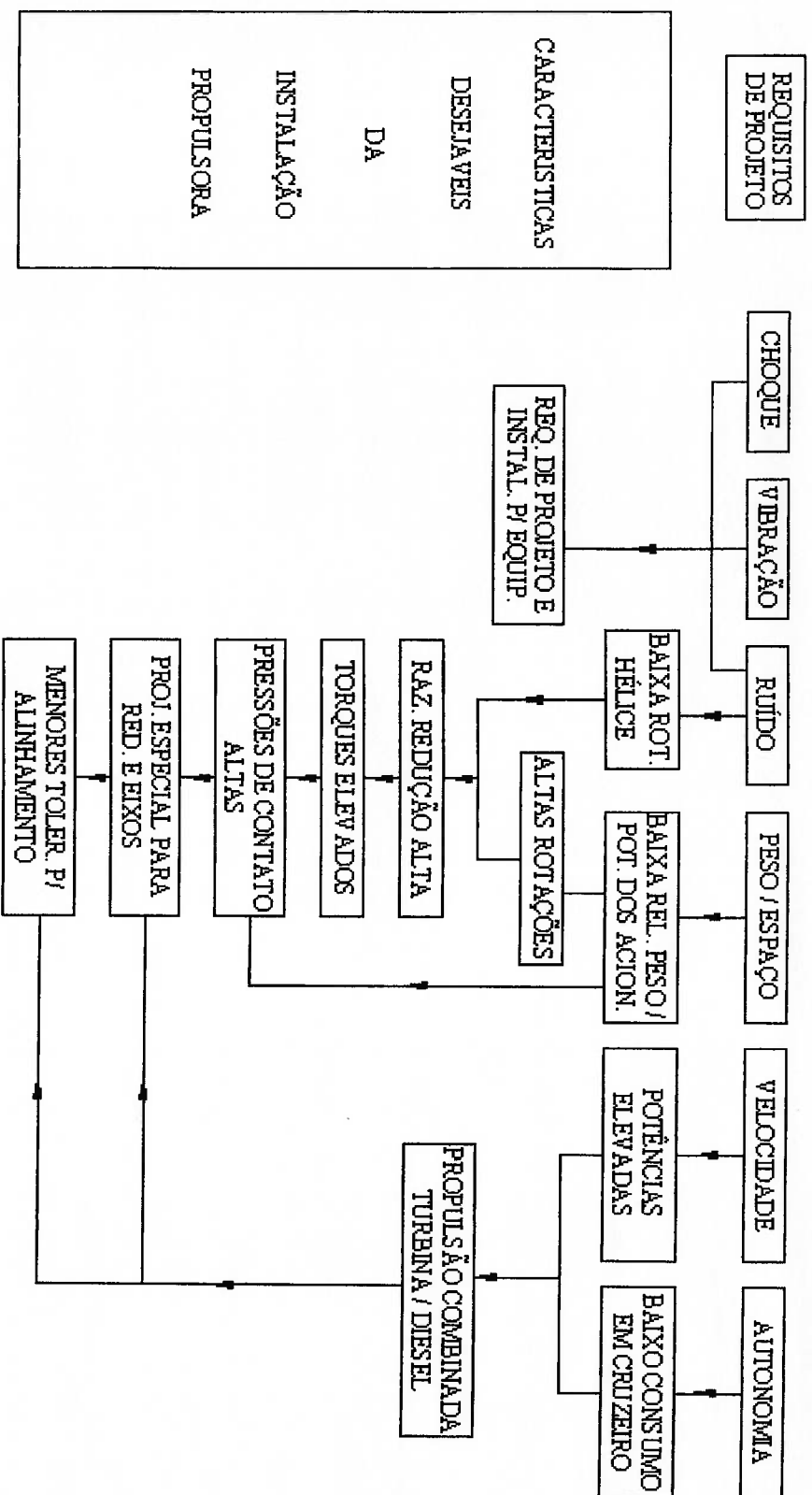


Figura 3.1- Efeitos dos requisitos de desempenho das corvetas classe "Inhãúma" sobre o projeto de sua instalação propulsora

As armas são características específicas dos navios de guerra. Como mencionado por Preston (1990), o armamento está composto principalmente por canhões e mísseis anti-aéreos e antinavios, que podem também ser usados contra alvos terrestres. Os mísseis são as armas mais sofisticadas e de maior alcance atualmente. Os canhões diminuíram de tamanho desde a II Guerra Mundial, sendo os de calibre médio (entre 100mm e 152 mm) os mais usados hoje, mesmo em navios grandes como os cruzadores. Algumas armas são especificamente navais, como os torpedos e as minas flutuantes.

3.2 INSTALAÇÕES PROPULSORAS USADAS EM NAVIOS MILITARES

Ha uma variedade bastante grande de instalações empregadas para propulsão de navios. Algumas delas têm maiores aplicações em navios mercantes enquanto que outras estão praticamente restritas a embarcações de fins militares. Como indicado pelo “Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo” em seu artigo sobre navios de guerra de superfície (2002), as instalações propulsoras destes navios são compostas principalmente por motores diesel, turbinas a gás ou a vapor e motores elétricos, utilizados isoladamente ou em forma combinada, de modo a atender os requisitos de operação e otimizar os custos de instalação e manutenção. A energia necessária à movimentação desses equipamentos pode ser proveniente de combustíveis fósseis, os mais variados, ou da fissão nuclear de materiais radioativos.

As instalações combinadas envolvem, normalmente, dois tipos diferentes de máquina principal e são, em geral, empregadas em navios de guerra. Estes navios possuem duas condições de operação distintas com requisitos de potência bem diferentes. Assim, em uma condição de pequeno consumo de potência utiliza-se uma das máquinas e na condição de alta potência utiliza-se a outra ou as duas simultaneamente. Existem diferentes tipos de instalações combinadas, como mencionado no trabalho de Rizzoli (2002), sendo a mais conhecida aquela que utiliza motor diesel e turbina a gás. Para este tipo de instalação combinada a turbina a gás é sempre empregada para alta potência enquanto que para baixa potência usa-se o motor diesel de média ou alta rotação.

O sistema propulsivo de um navio de guerra, do ponto de vista externo, é composto por pelo menos dois eixos, geralmente com hélices de passo variável. Uma instalação propulsora com apenas um eixo é pouco usada devido à pequena confiabilidade e baixas características de manobrabilidade que irá proporcionar ao navio, características estas incompatíveis com um navio de guerra.

Do ponto de vista da configuração das máquinas principais, o sistema de caldeiras e turbinas a vapor, muito usado até meados da década de 1960, foi descontinuado passando a serem usados sistemas com motores diesel ou turbinas a gás, bem como sistemas que combinavam turbinas a gás e motores diesel. Outra combinação possível era o uso de dois tipos de turbinas, uma para velocidade de cruzeiro e outra para velocidade máxima. O sistema que combina motores diesel (velocidade de cruzeiro) e turbina a gás (velocidade máxima) é conhecido como CODOG (*Combined Diesel or Gas*); esta é a opção da maior parte dos navios de guerra tipo fragata e destróier devido a seu grande deslocamento e altas velocidades que devem atingir. O sistema com dois tipos de turbinas, uma para velocidade de cruzeiro e outra para velocidade máxima é conhecido como COGOG (*Combined Gas or Gas*), e o sistema que geralmente utiliza um único tipo de turbina, com a característica que a potência das turbinas soma-se para atingir a velocidade máxima, é conhecido como COGAG (*Combined Gas and Gas*), sistema usado por exemplo pelas fragatas classe “*Oliver Hazard Perry*” da Marinha dos Estados Unidos.

Alguns navios de guerra, como as fragatas alemães da classe F-124 e as corvetas da classe Meko A-200, utilizam um sistema chamado CODAG (*Combined Diesel and Gas*) que usa apenas uma turbina a gás GE LM 2500, que é acoplada aos eixos propulsores juntamente com os motores diesel, quando o navio necessita de velocidade máxima, através de uma transmissão central. Neste caso, soma-se a potência dos motores diesel e da turbina a gás, conseguindo-se assim uma potência total pouco inferior ao comum sistema CODOG com duas turbinas e dois diesel funcionando separadamente em cada eixo de transmissão. Tanto em custo de aquisição como de funcionamento, este sistema é significativamente mais econômico.

Mais recentemente surgiu um sistema que combina turbinas a gás e motores elétricos, conhecido como CODLAG (*Combined Diesel Electric and Gas Turbine*). Este sistema emprega motores diesel acionando geradores elétricos que fornecem energia para os motores elétricos, responsáveis pela velocidade de cruzeiro, e turbinas a gás para a velocidade máxima.

As próximas três classes de navios a serem construídos pela “Royal Navy”, como indicado no trabalho de Pengelly (1999), deverão usar somente sistemas integrados de propulsão elétrica total (*Integrated Full Electric Propulsion – IFEP*), baseada em motores de propulsão magnética permanente (*Permanent Magnet Propulsion Motors – PMPM*) alimentados por geradores acionados por turbinas a gás de ciclo avançado (*Advanced Cycle Gas Turbine – ACGT*). Os motores mencionados são também conhecidos como motores IPM (*Internal Permanent Magnet*) ou motores com ímãs permanentes. A vantagem desses motores é a economia de energia, alto torque e a possibilidade de operação suave em baixíssimas rotações, como mencionado no artigo de Di Grazia (2001). Nos motores de indução standard, o campo magnético é gerado nos enrolamentos do estator, consumindo energia elétrica. Nos motores IPM, o campo é gerado no rotor por ímãs permanentes, proporcionando redução no consumo de energia. Em relação à turbina a gás, fabricada pela *Rolls Royce*, é chamada de ciclo avançado por ter incorporado um ciclo com resfriamento intermediário (*intercooling*) e um regenerador (aproveitamento da energia dos gases de exaustão), que permitem um baixo consumo específico de combustível, tanto em baixa como em alta potência, fornecendo características de consumo de combustível comparáveis a um motor diesel.

Existem também navios de guerra com propulsão nuclear. Eles têm como principal característica a utilização de um reator nuclear de água pressurizada (*PWR – Pressurized Water Reactor*), por meio do qual é produzido vapor para a movimentação das turbinas de propulsão e para geração da energia elétrica necessária a bordo. Embora alguns países tenham utilizado a propulsão nuclear em navios mercantes e embarcações quebra-gelo, seu uso se consagrou em navios militares do tipo porta-aviões (CVN) e cruzadores (CGN), permitindo, graças à

grande capacidade de armazenamento de energia, a manutenção de altas velocidades (superiores aos 30 nós) por longos períodos de tempo, sem necessidade de reabastecimento de combustível.

A maior parte de navios de guerra de superfície utiliza instalações propulsoras com máquinas de alta rotação, razão pela qual é impossível acoplar estas máquinas diretamente ao eixo propulsor, sendo necessária a utilização de uma redução mecânica ou elétrica para tornar compatível a alta rotação da máquina com a rotação relativamente baixa do hélice, necessária para se obter uma boa eficiência do propulsor. O emprego de engrenagem redutora, com simples ou dupla redução, para atender este requisito, é a alternativa comumente escolhida.

Em relação ao elemento propulsor os tipos mais utilizados são os hélice de passo fixo e os hélice de passo controlável. O hélice de passo fixo é de grande aplicação em quase todos os tipos e portes de embarcação, devido essencialmente a sua simplicidade construtiva e operacional. Sua principal característica é possuir um passo fixo, determinado em projeto, proporcionando o melhor rendimento para uma dada potência e rotação do eixo. Obviamente, este tipo de propulsor é mais adequado para embarcações que trabalhem com velocidade de serviço constante. Isto não acontece, por exemplo, com os navios de guerra, que necessitam de uma faixa de velocidade muito ampla para realizar suas diversas operações. Neste caso, é provável que este tipo de propulsor muitas vezes trabalhe fora do ponto ideal de projeto.

O hélice de passo controlável é um pouco mais complexo no que diz respeito a sua forma construtiva, permite a variação do passo das pás, possibilita a variação da velocidade do navio, sem que seja necessária muitas vezes a variação da rotação do eixo do motor. Para embarcações que necessitem de um melhor controle, na sua faixa de velocidades, este é o tipo de propulsor mais indicado. Apesar de possuir um custo inicial, e um custo de manutenção maior, comparado com hélice de passo fixo, tem se mostrado mais eficiente e mais utilizado nas embarcações que necessitam de controle de sua velocidade. Este tipo de hélice proporciona uma grande flexibilidade de manobra que é uma característica fundamental em navios de guerra.

3.3 INSTALAÇÕES PROPULSORAS EMPREGADAS EM CORVETAS

Os projetos modernos de corvetas dividem-se em duas categorias: as corvetas rápidas de ataque (baseadas nos Barcos de Patrulha Rápidos – ampliados e melhorados) com deslocamento de até 1.000 toneladas, e as fragatas ligeiras com deslocamento entre 1.000 e 2.000 toneladas, como as Classe Meko 100 e Classe Inhátuma/Barroso, que deslocam mais de 1.900 toneladas. Cada abordagem tem desvantagens inerentes em comparação com as fragatas comuns, em particular no que toca à capacidade de permanência nos vários estados de mar, autonomia e raio de ação, levando a uma definição proposta de serem, segundo De Bakker (1990), “os maiores navios incapazes de operarem independentemente fora de área”. Assim, nenhuma corveta foi projetada para fazer operações oceânicas contínuas. Também não foram projetadas para integrar uma Força de Tarefa nem servir de escolta de longo curso.

Em relação ao mencionado no parágrafo anterior, o tipo de instalação propulsora adotado pode ser influenciado pelo porte e pela missão do navio. Por esta razão foi feito um levantamento de informações sobre navios semelhantes à corveta “Delfim”, com a finalidade de identificar quais são as configurações de instalações mais usadas nesta classe de navios de guerra. Cabe mencionar que a corveta “Delfim” pertence à categoria das corvetas rápidas de ataque.

Para fazer o levantamento de informações, foram consultadas revistas e publicações tais como *Jane's Navy International* (2000), *Maritime Defence* (1996), *International Defence Review* (1990), *Jane's Fighting Ship* (1997-1998), assim como diversos sites da internet, de onde foram selecionados os navios semelhantes cujas características são apresentadas na tabela 3.1. Embora os navios encontrados não preencham totalmente as características do navio em estudo, eles são fontes de informação úteis para se identificar a tendência de uso de instalações propulsoras em navios tipo corvetas rápidas de ataque. Cabe destacar que, como se trata de navios militares, não existem muitas informações específicas disponíveis.

Tabela 3.1 - Dados de navios semelhantes

País	Navio	Desloc. (tons.)	Dimensões (metros)	Tipo I.P.	Nº Motores ou Tag	Eixos	Potência total (hp)	Veloc. (nós)	Ano const.
Arábia Saudita	Abdul Aziz	478	58,1 x 8,1 x 2	CODOG	02 motores 02 turbinas	02	3470 23000	25 38	1981
Argélia	Djebel Chinoise	540	58,4 x 8,5 x 2,6	Diesel	03 motores	03	12800	31	1988
Bahrain	Al Muharrag	632	63 x 9,3 x 2,9	Diesel	04 motores	04	12820	32	1988
Chile	Chipana	450	58 x 7,8 x 2,4	Diesel	04 motores	04	11880	32	1974
China	Houjian	520	65,4 x 8,4 x 2,4	Diesel	03 motores	03	15840	32	1991
China	Houxin	480	65 x 7,2 x 2,3	Diesel	04 motores	04	13200	32	1992
Dinamarca	Viben	450	54 x 9 x 2,5	CODAG	02 motores 01 turbina	03	5800 5450	20 30	1994
Emiratos Arabes Unidos	Murray Jip	630	63 x 9,3 x 2,5	Diesel	04 motores	04	13640	32	1990
Ecuador	Esmeralda	685	62,3 x 9,3 x 2,5	Diesel	04 motores	04	22140	37	1982

Tabela 3.1 - Dados de navios semelhantes (continuação)

Pais	Navio	Desloc. (tons.)	Dimensões (metros)	Tipo I.P.	Nº Motores ou Tag	Eixos	Potência total (hp)	Veloc. (nós)	Ano const.
Grécia	Plotarhis Blessas	425	56,2 x 8 x 2,1	Diesel	04 motores	04	17060	36	1977
Índia	Abhay	520	59,5 x 10,2 x 3,3	Diesel	02 motores	02	11520	32	1989
Índia	Vijay Durg	850	59,3 x 11,8 x 2,6	Diesel	03 motores	03	21600	34	1976
Índia	Vinash	450	56,1 x 11,5 x 2,5	CODOG	01 turbina 02 motores	02	5110 23300	36	1993
Iraque	Mussa Ben Nussair	685	62,3 x 9,3 x 2,5	Diesel	04 motores	04	20120	37	1986
Israel	Hetz	488	61,7 x 7,6 x 2,5	Diesel	04 motores	04	16600	31	1991
Líbia	Assad Albihar	670	61,7 x 9,3 x 2,2	Diesel	04 motores	04	15000	34	1979
Malásia	Saad Abi	705	62,3 x 9,3 x 2,5	Diesel	04 motores	04	20120	37	1988
Marrocos	Assad	705	62,3 x 9,3 x 2,5	Diesel	04 motores	04	20120	37	1987
Nigéria	Erinomi	780	69 x 9,6 x 3	CODAD	04 motores	02	22140	27	1980

Tabela 3.1 - Dados de navios semelhantes (continuação)

País	Navio	Desloc. (tons)	Dimensões (metros)	Tipo I.P.	Nº Motores ou Tag	Elxos	Potência total (hp)	Veloc. (nós)	Ano const.
Polônia	Gornik	455	56,1 x 11,5 x 2,5	COGOG	04 turbinas	02	20400	35	1983
Romênia	Lastunul	450	56,1 x 11,5 x 2,5	CODOG	02 motores 02 turbinas	02	8000 20400	36	1985
Rússia	Nanuchka	850	59,3 x 11,8 x 2,6	Diesel	03 motores	03	21600	36	1978
Rússia	Tarantul	455	56,1 x 11,5 x 2,5	CODOG	02 motores 02 turbinas	02	8000 16016	36	1981
Singapur	Valour	550	62,4 x 8,5 x 3,1	Diesel	04 motores	04	15020	35	1990
Sudáfrica	Magnus Malan	430	62,2 x 7,8 x 2,4	Diesel	04 motores	04	15000	32	1986
Turquia	Karayel	436	58,1 x 7,6 x 2,7	Diesel	04 motores	04	17700	38	1995

A tabela 3.2 mostra uma síntese dos dados apresentados na tabela 3.1, ressaltando que o tipo de máquina principal mais usado é o motor diesel e o arranjo de instalação propulsora mais utilizado é aquele que emprega quatro (04) eixos, sendo cada um deles acionado por um único motor diesel.

Tabela 3.2 – Síntese das instalações propulsoras empregadas em corvetas semelhantes a corveta “Delim”

TIPO INSTALAÇÃO PROPULSORA	Nº EIXOS	QUANTIDADE	PORCENTAGEM (%)
DIESEL	04	14	53,85
DIESEL	03	04	15,38
DIESEL	02	01	3,85
CODOG	02	04	15,38
CODAG	03	01	3,85
CODAD	02	01	3,85
COGOG	02	01	3,85
TOTAL	----	26	100

Dos 26 navios apresentados, 14 deles, isto é 53,85%, usam este tipo de arranjo de instalação propulsora. O seguinte tipo de instalação propulsora mais usado é o tipo CODOG (*Combined Diesel or Gas*) e o tipo diesel de 3 eixos, cada um deles utilizado em 4 navios o que equivale a 15,38% do total. Pode-se observar na tabela 3.1 que os navios com instalação propulsora CODOG foram construídos a partir da década de 1980 e, neste caso, usam somente dois eixos.

As corvetas que usam instalação propulsora unicamente com motores diesel têm 3 ou, em sua maioria, 4 eixos. Uma possível explicação para uso de 3 ou 4 eixos é que neste tipo de instalação propulsora não é possível, somente com dois hélices, fornecer o empuxo necessário para atingir as altas velocidades requeridas pelo navio.

Uma outra explicação é que não se dispunha, na época, de um motor diesel de alta rotação com potência suficiente para que a instalação propulsora tenha só dois eixos e não se quer colocar dois motores por eixo por razões de arranjo.

Como todos estes navios são de ataque, pode-se verificar que todos eles atingem velocidades superiores aos trinta (30) nós, razão pela qual precisam de instalações propulsoras que desenvolvam altas potências.

O emprego da corveta é previsto, prioritariamente, em missões de defesa, aproximada ou afastada do litoral, em ações de superfície, em missões de proteção do tráfego marítimo de cabotagem, provendo escolta a comboios selecionados, e em

Como mencionado no capítulo 3, a corveta, apesar de ser um navio de guerra, não é um navio de categoria oceânica, seu uso é restrito à Plataforma Marítima Nacional. Como consequência é o tipo ideal de embarcação para as marinhas costeiras e para os países que tem em seu litoral arquipélagos e outros acidentes geográficos, tais como: estreitos, pequenos mares internos, fiordes, etc.

4.1 REQUISITOS DE MISSÃO

Apresenta-se neste capítulo a descrição da corveta "Delim" e de sua instalação propulsora. Inicialmente são definidos os requisitos de missão assim como as dimensões principais e características do navio. Em seguida, é feita uma descrição da instalação propulsora original e de seus principais equipamentos. Apresenta-se depois, a modificação do projeto original bem como uma explicação sobre o sistema "hyperbar". Finalmente, é feita uma descrição do desempenho atual da instalação propulsora.

4 A CORVETA E SUA INSTALAÇÃO PROPULSORA

CAPÍTULO 4

missões que resultem na negação do uso do mar pelo inimigo em áreas restritas e selecionadas. Secundariamente a corveta poderá ser empregada em missões de proteção ao tráfego marítimo transoceânico. Portanto, os requisitos dos vários sistemas do navio foram estabelecidos de maneira a garantir que a corveta, como um sistema único, venha a cumprir a missão fixada.

Os Requisitos de Alto Nível (RAN) representam uma extensão dos requisitos operacionais, estipulam o custo máximo que deverá ser perseguido durante o projeto e apresentam restrições que poderão afetar o projeto, tais como o perfil de utilização do navio.

A seguir apresenta-se o resumo dos principais Requisitos de Alto Nível, estabelecidos pelo Estado Maior da Armada, que tem relação com a instalação propulsora e devem ser atendidos pela corveta “Delfim” :

- A velocidade máxima mantida pela corveta deverá ser a maior possível e não inferior a 30 nós, sob as seguintes condições :
 - deslocamento máximo carregado
 - tempo do navio fora do dique – 3 meses
 - estado do mar - 3
 - velocidade do vento - 15 nós
- A velocidade em cruzeiro de paz deverá ser de 15 nós e, em cruzeiro de guerra, de 17 nós.

- O raio de ação não deverá ser inferior a 3500 milhas a 15 nós.

- Autonomia : o período mínimo de operação contínua do navio no mar sem reabastecimento de provisões, sobressalentes e água, deverá ser no mínimo de 20 dias.

- Os gases de descarga dos motores devem ser descarregados abaixo da linha de água para evitar a detecção da embarcação por sensores infravermelhos.

- A corveta deverá ser capaz de realizar operações com helicóptero nas seguintes condições :

- estado de mar - 5
- velocidade de vento – 22 nós
- aproximação mais adequado

- Reabastecimento no mar : o navio deverá ser capaz de realizar operações de reabastecimento para receber simultaneamente óleo diesel, água doce e combustível de aviação, utilizando a velocidade de cruzeiro.

4.2 DIMENSÕES PRINCIPAIS E CARACTERÍSTICAS DO NAVIO

A construção da corveta “Delim” nos estaleiros da “Fincantieri” na Itália, foi iniciada em setembro de 1976, com lançamento previsto para junho de 1978 e entrega para julho de 1979. Todavia, o navio foi lançado ao mar em outubro de 1980 e só foi incorporado ao serviço ativo em setembro de 1982.

A vida útil projetada do navio é de pelo menos 25 anos e o custo de aquisição foi de 125 milhões de dólares, sendo que o sistema de armas representou 50% do custo total.

A corveta “Delim” é capaz de operar em ambientes saturados de emissões e bloqueios eletrônicos, sob ameaça aérea e de mísseis e pode desenvolver altas velocidades a baixo custo por longos períodos. A guarnição reduzida, adequada à automação, permite o controle de todos os seus sistemas, seja na propulsão, geração, distribuição de energia e controle de avarias, como também na detecção, coleta de informações e resposta tática.

As dimensões e características principais da corveta “Deffim” são as seguintes :

686 ton	•	Deslocamento carregado
63 m	•	Comprimento total
59,15 m	•	Comprimento da linha d'água
8,48 m	•	Boca na linha d'água
5,30 m	•	Pontal
2,70 m	•	Calado
0,494	•	Coefficiente de bloco
0,676	•	Coefficiente prismático
0,73	•	Coefficiente de secção mestra
37 nós	•	Velocidade máxima
15 nós	•	Velocidade de cruzeiro
3500 milhas	•	Raio de ação a velocidade de cruzeiro
30 dias	•	Autonomia
50 tripulantes	•	Tripulação
Diesel	•	Tipo instalação propulsora
04	•	Número de eixos propulsores

4.3 INSTALAÇÃO PROPULSORA ORIGINAL

Os requisitos do Estado Maior da Armada exigiam um navio rápido e de grande poder ofensivo. Estes aspectos convertidos em material, geraram um navio de aproximadamente 700 toneladas de deslocamento que devia atingir uma velocidade máxima contínua de 35,5 nós. Os projetistas decidiram que seriam necessários quatro motores de alta rotação de 6000 HP cada um, conectados através de uma engrenagem redutora a seu respectivo eixo. Os hélices são de passo fixo e, para ter uma boa eficiência, têm uma razão de área expandida maior que a unidade.

A instalação propulsora é disposta em duas praças de máquinas com dois motores cada uma; a que se situa a ré contém os motores que acionam os eixos

externos e a que se situa a vante contêm os motores que acionam os eixos interiores. As dimensões da praça de máquinas de vante são de 10,5 m de comprimento por 9,1 m de largura, enquanto a praça de máquinas de ré tem um comprimento de 10,0 m por 8,6 m de largura. A disposição dos motores propulsores e eixos no navio é mostrada na figura 4.1.

O controle das máquinas é efetuado desde o posto de controle, compartimento localizado entre as duas praças de máquinas, que dispõe dos dados operativos da instalação propulsora.

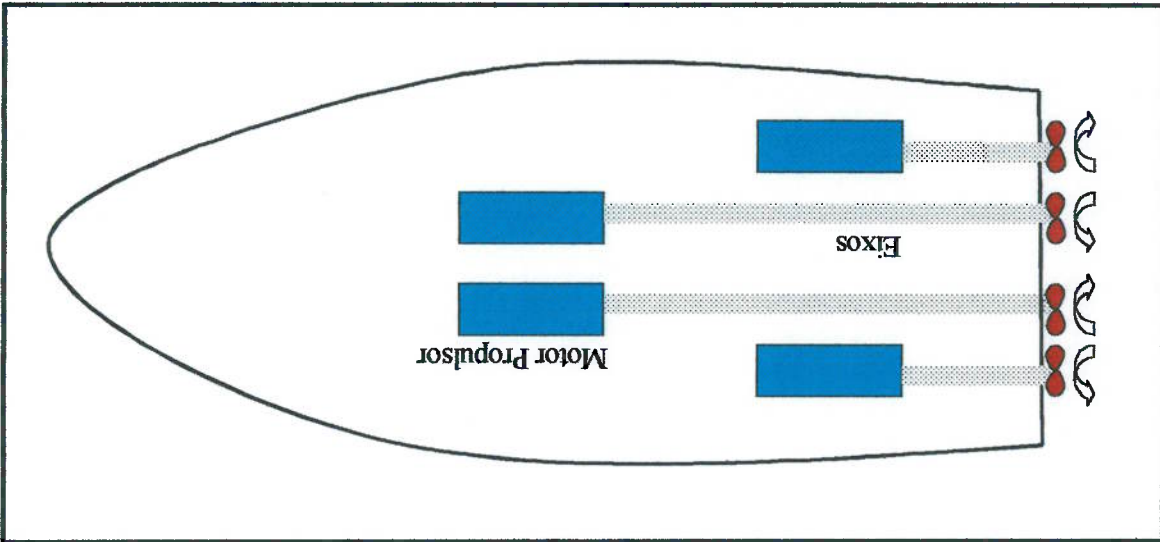


Figura 4.1 – Disposição dos motores e eixos na corveta “Delfim”

A geração de corrente alternada trifásica de 60 Hz e 450 volts, requerida pelo navio, é obtida por meio de três conjuntos diesel-geradores de 140 kW de potência cada um, fornecendo uma potência total instalada de 420 kW. Estes motores diesel têm um sistema de partida com ar comprimido a 30 bar. Os grupos diesel-geradores 1 e 2 encontram-se na praça de máquinas de vante e o grupo diesel-gerador 3 encontra-se na praça de máquinas de ré. Para uma navegação normal precisa-se de dois grupos diesel-geradores em funcionamento com carga dividida.

O sistema de governo, formado por dois lemes, é eletro-hidráulico e tem três formas de operação : telecomando, comando local ou emergência. Por isso considera-se muito difícil que o navio fique sem governo.

4.3.1 MOTORES PRINCIPAIS

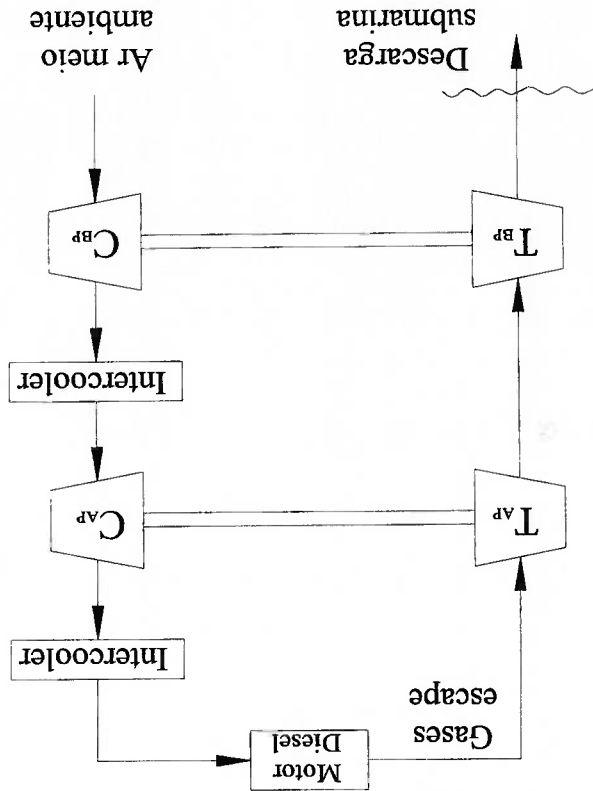
Os motores principais são do tipo 240 V16-EDS fabricados pela S.A.C.M. (Sociedade Alsaciana de Construções Mecânicas). É um motor de quatro tempos, com 16 cilindros em V, com injeção mecânica direta e câmara de combustão toroidal, caracterizado por uma dupla sobrealimentação (para conseguir uma maior pressão média efetiva). Cabe mencionar que este motor é protótipo já que os motores da série "240" tinham turbocompressor de um único estágio. O sentido de rotação do motor é o sentido contrário das agulhas do relógio (olhando o motor desde o lado do volante).

As principais características do motor são as seguintes:

-	Potência máxima contínua	5000 HP a 1350 rpm (p.m.e) _r = 20,5 Kgf/cm ²
-	Potência intermitente	5500 HP a 1395 rpm (p.m.e) _r = 21,7 Kgf/cm ²
-	Potência máxima	6000 HP a 1430 rpm (p.m.e) _r = 22,8 Kgf/cm ²
-	Comprimento do motor	4,2 m
-	Largura do motor	1,75 m
-	Altura do motor	2,12 m
-	Peso do motor completo	19 ton.
-	Curso do pistão	220 mm.
-	Diâmetro do cilindro	240 mm.
-	Cilindrada total	163,5 lts
-	Mínima rotação	500 RPM
-	Relação de compressão volumétrica	10/1

Como ilustrado nesta figura, o fluxo de gases de descarga dos cilindros incide diretamente sobre as palhetas da turbina de alta pressão e depois passa pela turbina do turbocompressor de baixa pressão, para logo ser descarregado ao exterior pelo escapamento abaixo da linha de água (escape submarino). O sentido do fluxo de ar

Figura 4.2 – Esquema do sistema de sobrealimentação do motor



A sobrealimentação do motor é realizada por meio de dois turbocompressores centrífugos, arranjados em série, que aproveitam os gases de escape dos motores conforme mostrado na figura 4.2.

- Temp. gases de descarga ao máximo contínuo 400 °C
- Consumo de combustível : A potência contínua 156 gr/hp-hora
- A ½ potência 162 gr/hp-hora
- Consumo de óleo lubrificante : 1,21 gr/hp-hora

(do meio ambiente) é inverso ao dos gases de escape pois os compressores estão instalados nos mesmos eixos que as turbinas dos conjuntos de alta e baixa pressão. O sistema de sobrealimentação inclui dois inter-resfriadores, o primeiro localizado entre os dois compressores e o segundo localizado antes da entrada do ar aos cilindros. O resfriamento do ar contribui para aumentar a densidade do ar, e com isto obter uma maior potência do motor, além de reduzir as cargas térmicas.

O turbocompressor de baixa pressão é do modelo VTR 401 enquanto o turbocompressor de alta pressão é do modelo VTR 320, fabricados pela *Asea Brown Boveri*. A razão de pressão de cada compressor situa-se entre 2 e 2,5/1, na região de maior eficiência. Nessa condição, a pressão de admissão nos cilindros do motor é de 3,8 bar. O turbocompressor de alta pressão está incorporado ao motor, enquanto o turbocompressor de baixa pressão está localizado num bloco separado do motor.

A figura 4.3 apresenta o diagrama de operação do motor SACM 240 V16, com suas curvas limites superiores de potência e rotação. São ainda mostradas nesta figura as curvas de consumo específico de combustível do motor e as curvas de potência requerida do propulsor. Embora este diagrama tenha sido fornecido pelo fabricante, existe também informação do mesmo fabricante que para rotação mínima, 500 rpm, a potência que o motor fornece é de 450 HP, dado este que não aparece explicitamente no diagrama.

4.3.2 ENGRENAGEM REDUTORA

A engrenagem redutora fabricada pela ZF MARINE é do modelo BWK 3500 e tem uma relação de redução de 2,243/1. Entre o motor e a engrenagem redutora estão instalados uma embreagem e um acoplamento flexível. A embreagem, que dispõe de discos de fricção, permite conectar, ou desconectar, o motor ao eixo propulsor. O acoplamento flexível tem a finalidade de atenuar as vibrações torcionais geradas pelo motor, bem como de permitir um certo desalinhamento entre os eixos do motor e da engrenagem redutora.

MOTOR SACM 240 V 16 EDS - CURVA CARACTERÍSTICA

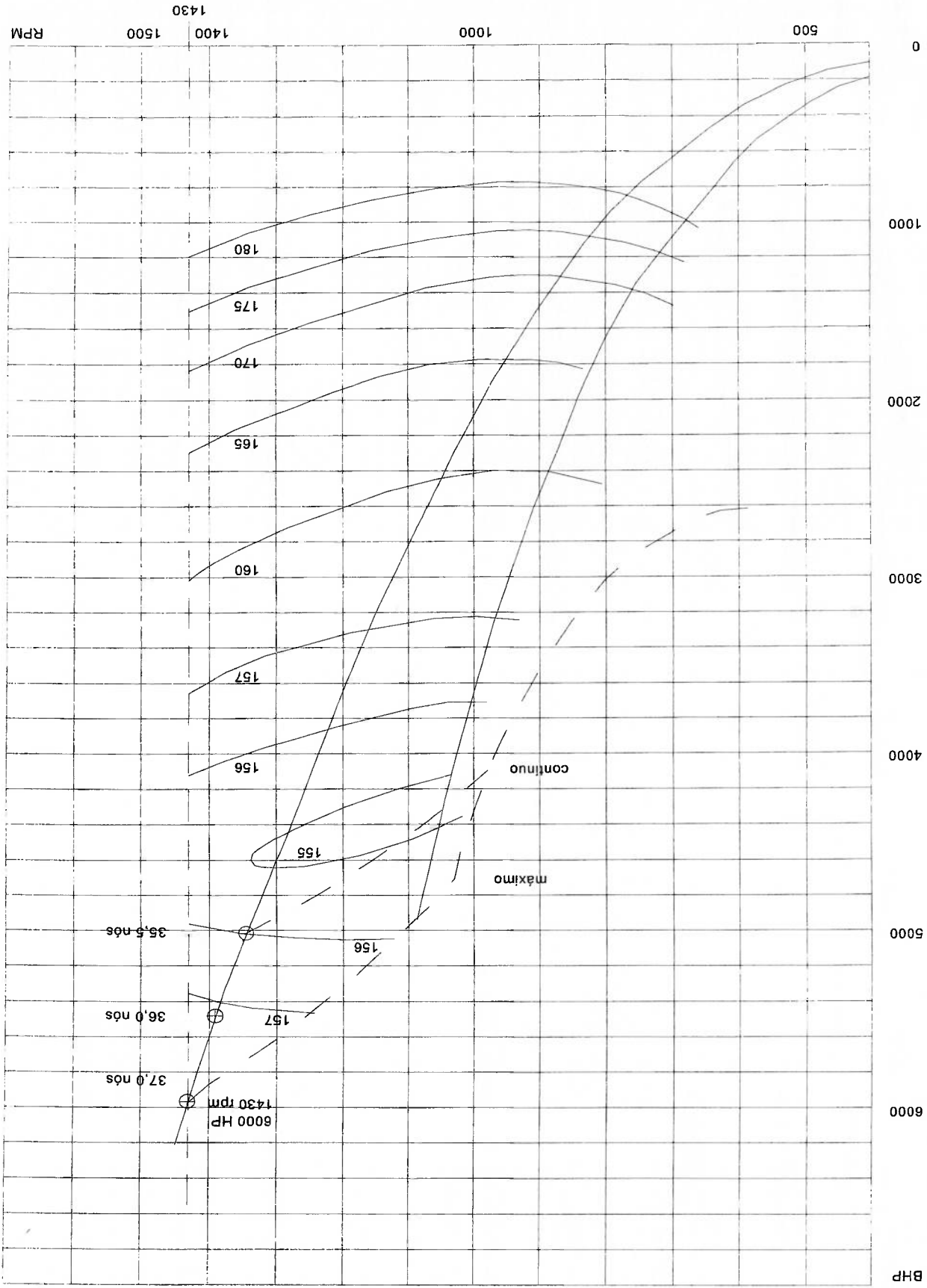


Figura 4.3 – Curva característica de operação do motor

A engrenagem redutora tem um circuito de lubrificação independente do sistema do motor principal. Este circuito de lubrificação dispõe de : duas bombas, primária (acionada pelo pincão de alta rotação que assegura a lubrificação normal) e secundária (acionada pela coroa que assegura a lubrificação em caso de eixo arrastado), de um filtro, de um resfriador de óleo e uma válvula de descarga.

4.3.3 EIXOS

Como mencionado anteriormente, o navio é propellido por quatro (04) eixos, dois eixos interiores e dois eixos exteriores. Os eixos interiores são acionados pelos motores 1 e 2 que estão localizados na praça de máquinas de vante, e os eixos exteriores são acionados pelos motores 3 e 4 que estão localizados na praça de máquinas de ré.

Os eixos interiores estão formados por três segmentos unidos por meio de flanges e são suportados por três mancais, enquanto os eixos exteriores estão formados somente por dois segmentos unidos por flange e são suportados por um mancal.

Na saída do navio e em cada pé de galinha o eixo se apoia em mancais tipo “Hydrolub”, assim chamados por serem resfriados por água de mar.

4.3.4 HÉLICES

A corveta “Delim” possui quatro hélices de passo fixo fabricados por France Hélices, cuja disposição no navio é mostrada na figura 4.4. As principais características do propulsor são as seguintes :

- Tipo : B-Troost
- Diâmetro : 1,65 m
- Número de pás : 4
- Razão passo/diâmetro : 1,4

- Razão de área expandida : 1,05
- Sentido de rotação : Bombordo externo antihorário
- (olhando de popa para proa)
- Bombordo interno horário
- Bombordo interno antihorário
- Boreste interno antihorário
- Boreste externo horário

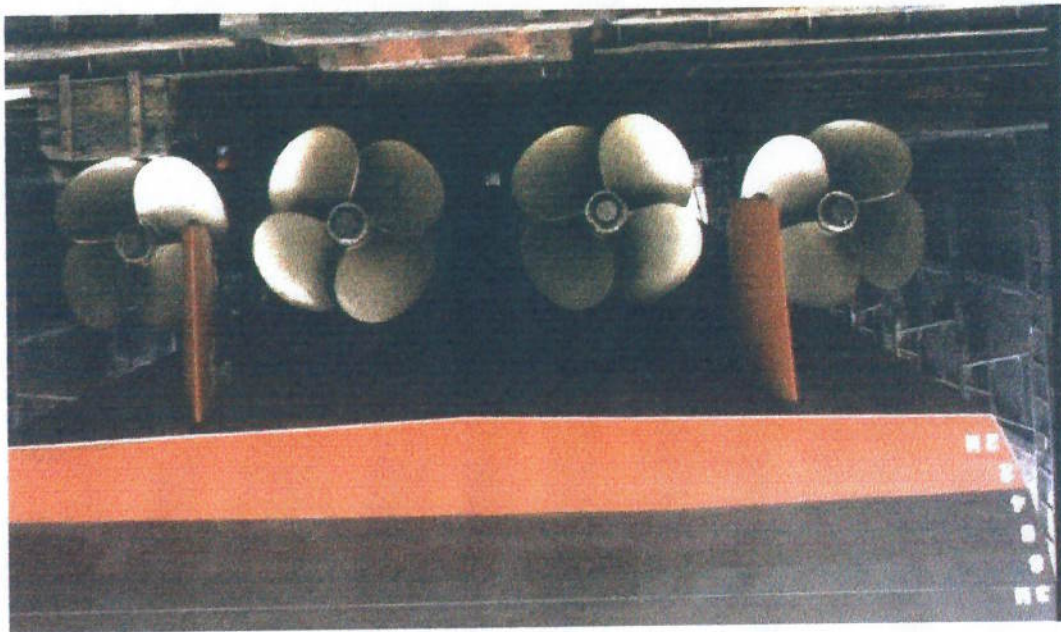


Figura 4.4.- Disposição dos hélices na corveta

4.4 MODIFICAÇÃO DO PROJETO ORIGINAL

O projeto da instalação propulsora da corveta precisou ser modificado antes que o navio entrasse em operação. Durante as provas de mar ocorreu um sério problema de desempenho da instalação propulsora. Em baixas rotações o torque fornecido pelo motor foi muito baixo e não conseguiu superar o torque resistente imposto pelo hélice, e como consequência o motor parava.

Dois fatores podem ser responsabilizados por esse problema. Em primeiro lugar, como mencionado anteriormente, os motores utilizados são protótipos com um sistema de turbocompressores em dois estágios, que não havia sido testado em outro navio. O segundo fator foi um requisito de projeto imposto pelo Estado Maior da

Armada. Os gases de escape dos motores devem ser descarregados abaixo da linha de água para evitar a detecção da embarcação por sensores infravermelhos.

Uma análise do problema ocorrido na prova de mar indicou a necessidade de rever o projeto da instalação propulsora. A solução proposta pelos fornecedores da instalação propulsora baseia-se no fato que motores turbocarregados têm problemas de desempenho em baixas rotações. Nestas condições, a energia dos gases de descarga dos cilindros não é suficiente para que as turbinas acionem os compressores. Para corrigir este problema foi proposta a introdução de um equipamento, chamado câmara hyperbar, que produziria uma quantidade adicional de gases para as turbinas nas condições de baixa potência do motor.

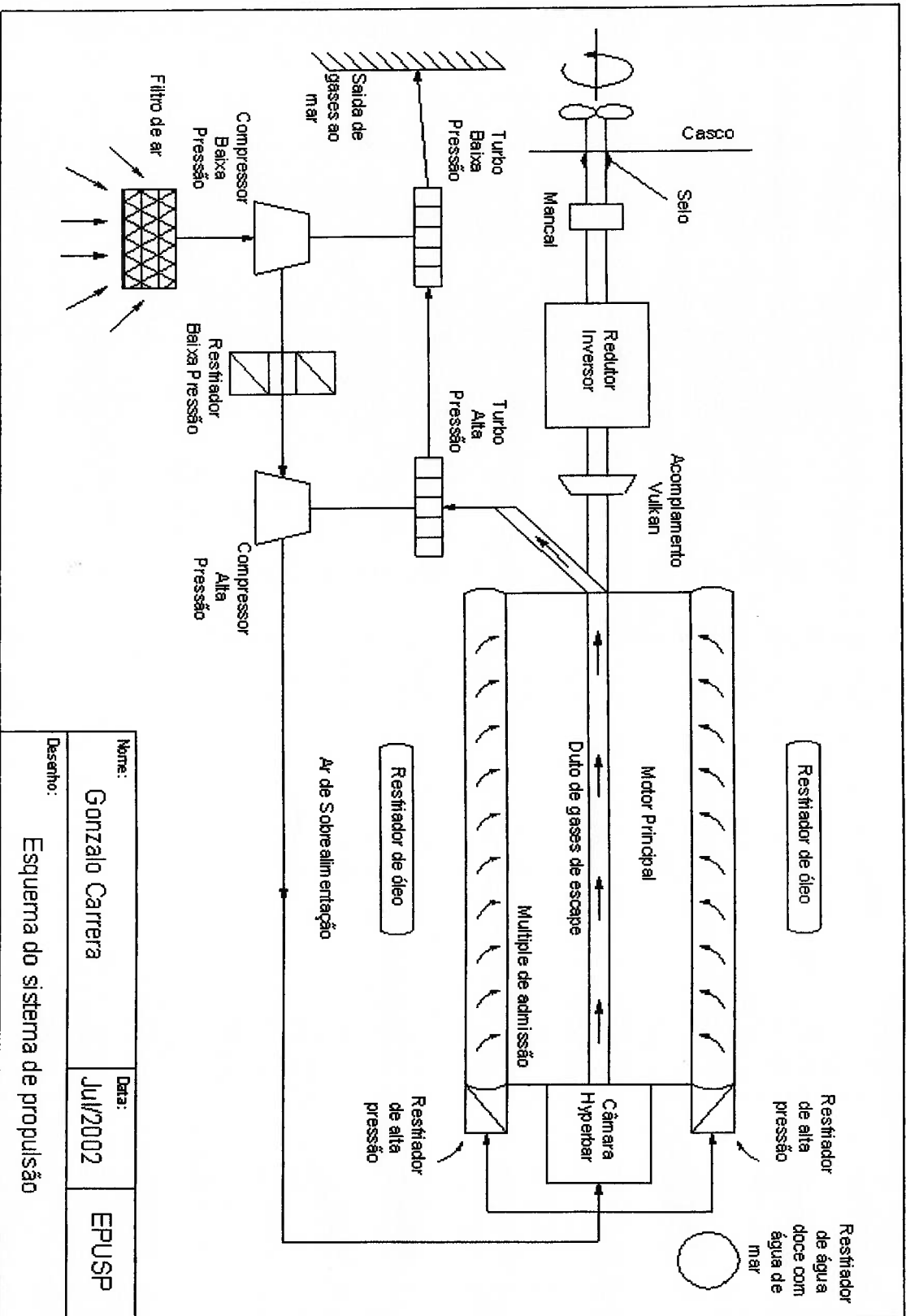
Uma representação geral da instalação propulsora com a câmara hyperbar é mostrada na figura 4.5.

4.4.1 SISTEMA HYPERBAR

Em regime de baixas velocidades e marcha ré, assim como durante o acoplamento do motor ao eixo propulsor, a instalação propulsora deve utilizar o sistema hyperbar. Este sistema produz a quantidade de gases adicionais requerida para acionar os turbocompressores, de modo que seja suprido o ar necessário para os cilindros e o motor gere potência suficiente para acionar o hélice.

A incorporação desta câmara auxiliar de combustão ao motor SACM 240 V16 EDS permite o aumento do torque motor em baixas rotações. A energia obtida pela queima do combustível na câmara hyperbar soma-se à energia dos gases de escape dos cilindros permitindo, desta forma, que o turbocompressor forneça a pressão de sobrealimentação desejada. Nestas condições, o motor dispõe, em baixas rotações, de uma quantidade de ar necessária para uma correta combustão assim como de uma maior potência.

Figura 4.5 – Esquema da instalação propulsora com a câmara hyperbar



Nome:	Gonzalo Carrera	Data:	Ju/2002	EPUSP
Desenho:	Esquema do sistema de propulsão			

O uso da câmara hyperbar ocorre durante o período de acoplamento do motor ao eixo propulsor, até que os turbocompressores alcancem sua rotação ótima de funcionamento, e durante as manobras do navio em baixas velocidades.

A câmara hyperbar está instalada na parte traseira do motor, entre os dois resfriadores de ar de alta pressão. Sua partida e parada é manual e ela utiliza o ar proveniente do compressor de alta pressão, assim como utiliza o mesmo combustível que os motores principais.

A câmara hyperbar é composta de quatro (04) elementos principais : um conjunto válvula de admissão de ar, um cárter portaválvula, um conjunto câmara de combustão e regulador de combustível, e um cárter porta-câmara.

A câmara de combustão e o regulador de combustível têm como função a produção dos gases de reforço, enquanto a válvula tem como função a distribuição do ar secundário, o de sua diluição, para conseguir a uniformização da temperatura na câmara de combustão.

O consumo de combustível médio da câmara hyperbar é de 170 Kg/hora.

4.5 DESCRIÇÃO DO DESEMPENHO ATUAL DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Para resolver o problema da reduzida capacidade de manobra do navio, em baixas rotações dos motores, a S.A.C.M. decidiu instalar em cada motor principal o sistema hyperbar. Obtem-se, desta forma, um fluxo adequado de gases quentes para as turbinas dos conjuntos turbocompressores e, em consequência, o motor fornece o torque requerido pelo hélice.

Com o passar do tempo de operação do navio, verificou-se que o sistema “hyperbar” não garantia mais uma operação satisfatória do sistema propulsor, embora seu uso fosse necessário pela dificuldade do navio para manobrar em baixas velocidades. Este equipamento trouxe diversos problemas, sendo um deles

rachaduras no duto dos gases de descarga. Devido às altas temperaturas apareceu uma fadiga prematura nas paredes dos dutos de descarga e nas palhetas dos turbocompressores, o que requer que o programa de manutenção seja aplicado em intervalos mais curtos. Outros problemas são o aumento do risco de incêndios nas salas de máquinas, devido às altas temperaturas de trabalho, resíduos de combustível no exterior da câmara de combustão, e degradação dos componentes dos turbocompressores por efeitos térmicos.

Como um outro efeito do uso da câmara hyperbar, o consumo de combustível aumenta bastante, o que aumenta o custo operacional do navio, além de limitar o seu raio de ação.

Os problemas apontados são fatores limitantes que impedem que o navio apresente condições operativas satisfatórias para cumprir com sua missão.

CAPÍTULO 5

5 AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Neste capítulo é feita uma avaliação do projeto da instalação propulsora da corveta “Delim” assim como uma análise do seu desempenho. Para a avaliação do projeto é examinada a escolha da concepção da instalação propulsora face aos diversos requisitos de potência da embarcação. Em seguida procede-se ao cálculo da potência requerida para verificar se a potência instalada é suficiente para satisfazer os requisitos de velocidade máxima. Logo, é analisado a seleção do conjunto propulsor. A avaliação do desempenho da instalação propulsora é feita considerando as condições de casco novo e de casco deteriorado por efeito de aumento de rugosidade.

5.1 AVALIAÇÃO DO PROJETO

Uma primeira avaliação é feita analisando a configuração escolhida para a instalação propulsora. Em seguida, verifica-se a compatibilidade entre a potência instalada e a demanda de potência para as velocidades que o navio precisa atingir. Para isto é feito o cálculo da potência requerida da máquina que, como mostrado no capítulo 2, começa pelo cálculo da resistência ao avanço.

5.1.1 TIPO DE INSTALAÇÃO PROPULSORA

A instalação propulsora tipo diesel com 4 linhas de eixos, considerando uma máquina por eixo, é o arranjo mais utilizado por navios com características similares à corveta “Delim”, como foi mostrado no capítulo 3.

A necessidade de atingir altas velocidades com um consumo específico de combustível baixo, bem como o espaço reduzido do navio, fazem que a instalação propulsora diesel seja a mais recomendável para este tipo de navio. Com baixo consumo específico de combustível tem-se volumes de tanque de armazenamento de combustível relativamente pequenos, o que é adequado às restrições de espaço do navio. Como mencionado no capítulo 2, o tipo de instalação propulsora que resulta em economia de espaço, apresenta uma vantagem considerável em navios de guerra.

Quanto à escolha dos motores, é preciso mencionar que as turbinas a gás, que seriam uma alternativa como máquina principal para velocidade máxima, têm uma relação potência/peso bem menor que os motores diesel. Uma comparação entre estas duas instalações mostra que, para uma mesma potência, as instalações com turbinas a gás pesam cerca de 20% a 50% menos que as instalações com máquinas diesel. Porém, o custo de aquisição e de operação de uma instalação com turbina a gás é maior que o de uma instalação com motor diesel, além de exigir uma manutenção mais especializada. Cabe ressaltar, como indicado no trabalho de Mulligan; Courts (1998), que geralmente mais de 70% do tempo de operação do navio será em velocidades que requerem menos que a metade da potência total disponível. Para uma instalação totalmente diesel, esta potência requerida pode ser atendida utilizando a metade do número de motores instalados. As informações mencionadas permitem afirmar que a escolha de motor diesel como máquina principal de propulsão foi acertada, pois oferece algumas vantagens em relação a outros tipos de máquinas propulsoras.

Em relação aos motores escolhidos, é importante ressaltar que o emprego de motores protótipos foi uma decisão incorreta. Especialmente no caso da propulsão de

embarcações militares, onde a confiabilidade é um fator de máxima relevância, não se justifica a escolha feita. Sabe-se que o uso de turbocarroamento de dois estágios proporciona ao motor diesel uma maior pressão média efetiva, e como resultado uma grande relação potência/tamanho. Esta é uma característica importante para a propulsão de navios rápidos e de pequeno deslocamento, já que se obtém altas potências com dimensões do motor menores que os motores diesel convencionais. Porém, o duplo estágio de carregamento veio acentuar o problema de funcionamento do motor turbocarroado em baixas rotações. Cabe ainda ressaltar que o duplo estágio de sobrealimentação foi um meio utilizado pela S.A.C.M. para aumentar a pressão média efetiva, e reduzir o consumo específico de combustível, já que o motor tem uma razão de compressão muito baixa (10:1).

O uso de mais de dois eixos na instalação propulsora, como da corveta "Deftim", pode ser explicado por diferentes razões. Com apenas dois eixos, os propulsores não podem fornecer, com nível aceitável de eficiência, o empuxo requerido para manter altas velocidades. Uma outra explicação é que não existe motor diesel de pequenas dimensões com potência suficiente para acionar estes hélices; assim, com a necessidade de se usar dois motores por eixo em um arranjo bi-hélice preferiu-se optar por utilizar 4 eixos, cada um acionado por um único motor diesel.

Se a alternativa à instalação propulsora com 4 eixos fosse uma instalação CODAD com dois eixos, existiria uma outra desvantagem quando se utiliza hélice de passo fixo. Nestas condições, o projeto do propulsor é efetuado para a somatória de potências das máquinas na rotação de projeto. Então, quando só uma das máquinas estiver fornecendo potência, o novo ponto de operação corresponderá a absorção de torque máximo de uma máquina, sem contudo alcançar a rotação de projeto do motor, como é mostrado na figura 5.1. Neste caso, a potência fornecida por um motor, seria menor que metade da potência total instalada por eixo. Assim, considerando que a demanda de potência do navio e a disponibilidade de motores no mercado exigem o emprego de 4 máquinas principais, a opção por um sistema com 4 eixos é superior à alternativa CODAD com 2 eixos.

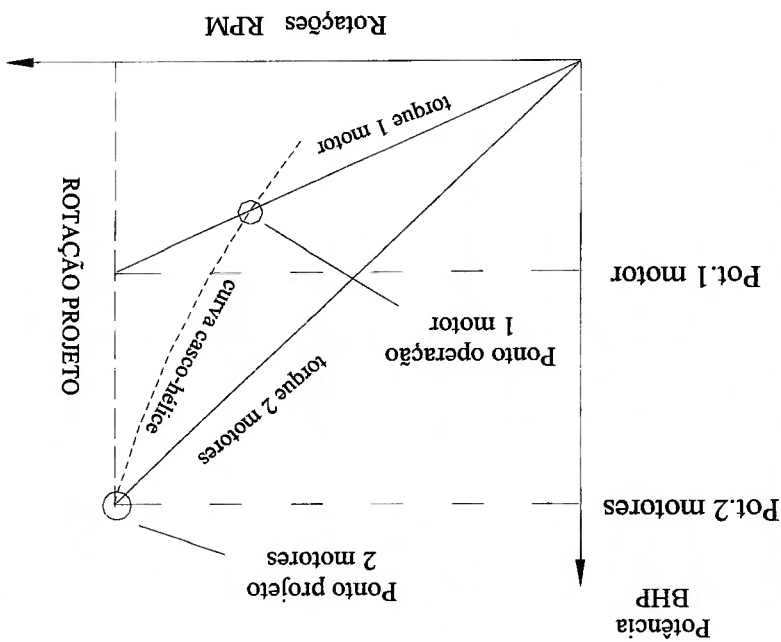


Figura 5.1.- Condições de operação do hélice com dois motores iguais por eixo

Em relação à escolha do tipo de propulsor, deve-se ressaltar que o hélice de passo fixo tem o passo determinado em projeto, o qual busca o melhor rendimento para uma dada potência e rotação do eixo. Obviamente, este tipo de propulsor é mais adequado para embarcações que trabalham com velocidade de serviço constante. Isso não é o caso de navios de guerra, que necessitam de uma faixa de velocidade muito ampla para cumprir seus requisitos operacionais e também precisam efetuar manobras com acelerações rápidas. Neste caso, o hélice de passo controlável é o tipo de propulsor mais indicado. Este tipo de hélice proporciona uma grande flexibilidade de manobra que é uma característica exigida para embarcações militares.

Para o caso da corveta “Defim” dois argumentos justificariam a escolha de propulsor de passo controlável. Em primeiro lugar, pode-se conseguir, por meio da redução do passo, um menor torque do propulsor possibilitando o acoplamento do motor sem a necessidade da inclusão da câmara hyperbar. Esta característica de poder variar o passo do hélice e reduzir o torque demandado é importante para a condição de baixas rotações do motor diesel, onde a potência fornecida por ele é

baixa. Adicionalmente, o uso do hélice de passo controlável permite ajustar a curva de potência requerida do propulsor, quando ocorre acréscimo de resistência do casco, de forma a utilizar a máxima potência fornecida pelo motor.

5.1.2 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Para o cálculo da resistência ao avanço, bem como da potência efetiva da corveta “Delim” na condição de projeto, foi utilizado o programa “AUTOPOWER” que emprega o método de Holtrop. Para utilização do método, certificou-se inicialmente que as características deste navio se enquadraram nas faixas de adimensionais especificadas por Holtrop, conforme mostrado abaixo :

$(Fn)_{Delim} = 0,76$	<	1,0
$(Cp)_{Delim} = 0,68$	<	0,85
$(B/T)_{Delim} = 3,14$	<	4,00
$(L/B)_{Delim} = 6,98$	>	14,90

Para o cálculo da resistência ao avanço pelo método de Holtrop, são utilizados os valores de uma série de parâmetros do navio. Os dados principais estão apresentados na tabela 5.1 e foram considerados para o calado de projeto. As informações adicionais exigidas para uso do programa “Autopower” são apresentadas no anexo A.

A curva de resistência ao avanço (R_T) obtida com o programa “Autopower” para o calado de projeto, corresponde à condição de casco limpo e mar calmo, e os resultados são apresentados na tabela 5.2, assim como na figura 5.2.

Como a resistência ao avanço foi obtida para condições de casco limpo e mar calmo, é necessário definir o fator de serviço para considerar o incremento desta curva para condições médias esperadas de casco e mar. Por dados experimentais sabe-se que o acréscimo de resistência devido a estes fatores (mar e casco), situa-se entre 15 e 25%. Como a corveta “Delim” opera normalmente em zonas perto do

litoral, onde o mar não é geralmente severo, e que tem um programa de docagens rigoroso, de intervalos curtos, para evitar a acumulação de incrustações no casco, adota-se neste trabalho um incremento de 15%, o qual é aplicado à curva de resistência ao avanço para deslocamento de projeto. Os resultados são incluídos na tabela 5.2 e na figura 5.2.

Tabela 5.1 - Dados principais utilizados para o cálculo da resistência ao avanço (R_T)

CARACTERÍSTICAS	
CALADO	2,70 m
Comprimento da linha de água (m)	59,15
Boca moldada (B) (m)	8,48
Calado médio (D) (m)	2,70
Deslocamento (Ton.)	686
Coefficiente de bloco (Cb)	0,494
Coefficiente prismático (Cp)	0,676
Coefficiente de área da linha de água (Cwp)	0,81
Coefficiente de seção mestra (Cm)	0,73
Fator de Forma (1+k)	1,220
Superfície molhada (m²)	528,9
Forma de proa do navio	V
Forma de popa do navio	Normal
Velocidade de serviço (nós)	25

A potência efetiva correspondente à curva de resistência ao avanço em condições de serviço é apresentada na tabela 5.2 e figura 5.3.

Tabela 5.2.- Resistência ao avanço e potência efetiva para calado de 2,70 m

VELOC. (NÓS)	RESIST. AO AVANÇO (R _T)	R _T COM FATOR DE SERVIÇO (KN)	POTÊNCIA EFETIVA (HP)
1	0,50	0,58	0,39
3	4,01	4,61	9,68
5	10,44	12,01	42,00
7	19,44	22,36	109,45
9	31,07	35,73	224,93
10	38,06	43,77	306,14
11	45,95	52,84	406,59
13	65,33	75,13	683,16
15	87,40	100,51	1054,55
16	97,75	112,41	1258,04
18	127,13	146,20	1840,57
20	182,47	209,84	2935,39
21	215,53	247,86	3640,55
22	249,88	287,36	4421,90
24	321,40	369,61	6204,51
25	358,08	411,79	7200,51
27	410,57	472,16	8916,52
28	426,13	490,05	9597,32
30	449,63	517,07	10849,83
31	458,90	527,74	11442,68
32	467,13	537,20	12023,55
33	480,74	552,85	12760,69
34	496,35	570,80	13574,25
35	512,46	589,33	14426,95
36	529,14	608,51	15322,30
37	546,45	628,42	16262,98

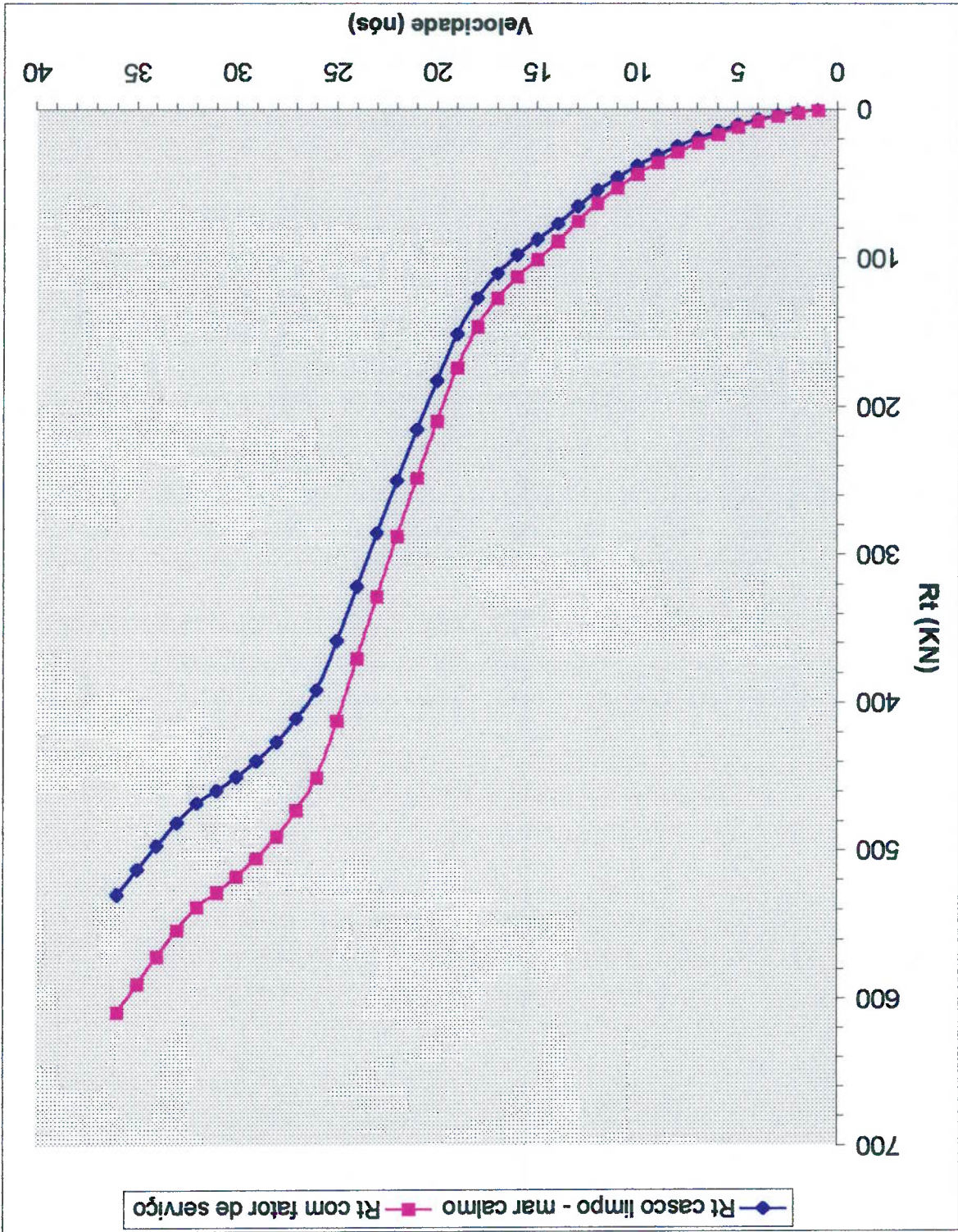


Figura 5.2 – Curvas de resistência ao avanço

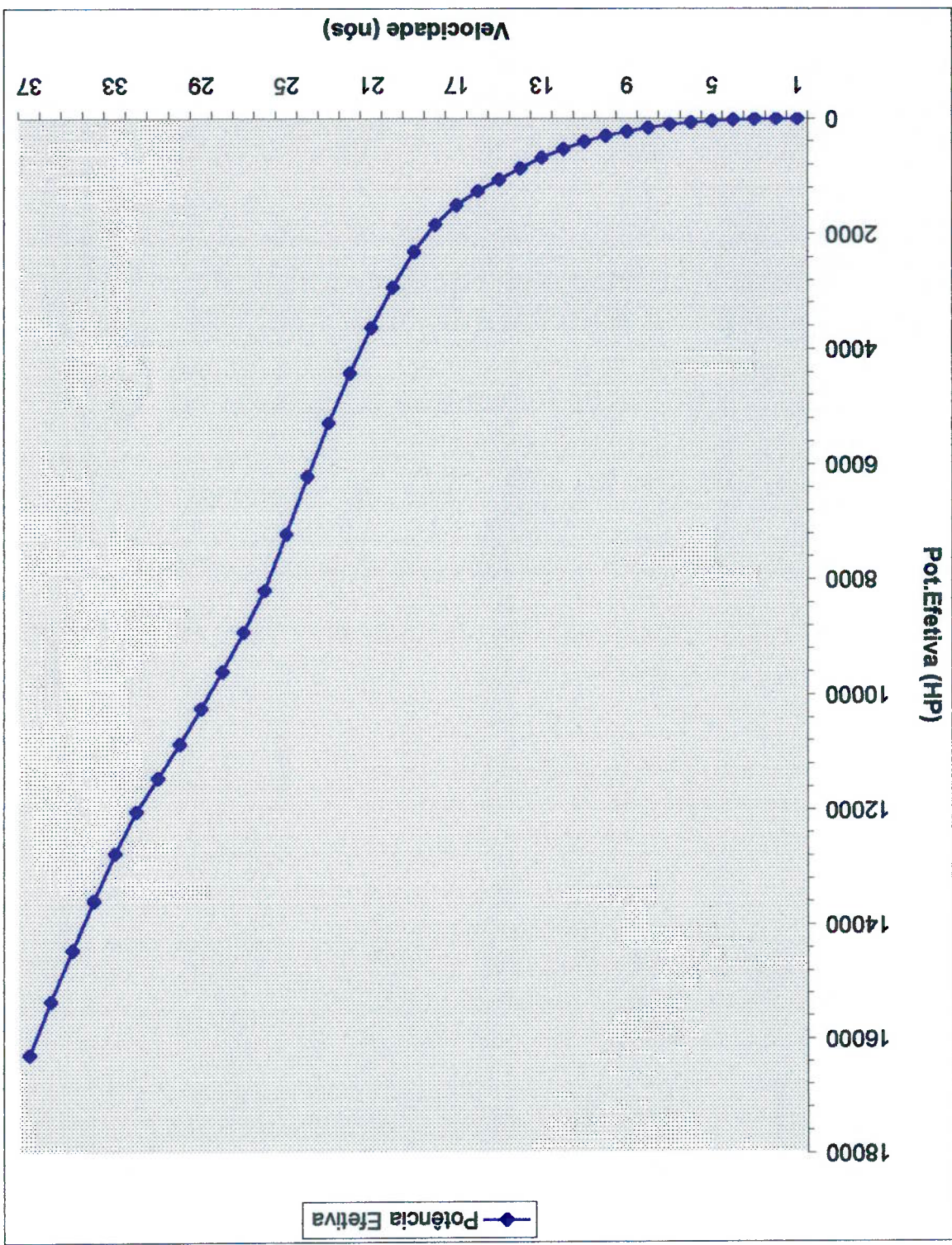


Figura 5.3 – Curva de potência efetiva para condições de serviço

5.1.3 REQUISITOS DE POTÊNCIA

Como foi mencionado no capítulo 2, para calcular a potência requerida da máquina, é necessário conhecer os valores da potência efetiva e do coeficiente quase-propulsivo. Para calcular o coeficiente quase-propulsivo é preciso conhecer os valores da eficiência do hélice em água aberta, da eficiência relativa rotativa e da eficiência do casco.

Com base nos ensaios efetuados pela “*Bassin d’Essais des Carenes*”, obtêm-se os valores da eficiência do hélice em água aberta mostrados na tabela 5.3. Cabe mencionar que o número mínimo de hélices em operação tem relação com o empuxo que o navio precisa para atingir a velocidade requerida.

Tabela 5.3 - Resultados do teste do hélice em água aberta

VELOCIDADE (NÓS)	HÉLICES EM OPERAÇÃO	EFICIÊNCIA DO HÉLICE (e ₀)
7	1	0,555
10	1	0,564
15	2	0,660
20	2	0,642
25	4	0,700
28	4	0,707
30	4	0,716
32	4	0,724
34	4	0,730
35	4	0,732
36	4	0,734
37	4	0,736

Usando as equações 2.13 e 2.14, obtêm-se os valores do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsora (t) respectivamente, para um coeficiente de bloco (Cb) de 0,494, que corresponde ao calado a plena carga do navio (2,70 m). Os resultados são mostrados a seguir:

$$w = 0,0698$$

$$t = 0,1088$$

Admitiu-se que os valores obtidos do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsora (t) são constantes para toda a faixa de velocidades pois não se dispõe de mais informações sobre o projeto do navio.

Com os valores do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsora (t), obtêm-se, usando a equação 2.12, o valor da eficiência do casco (eh) :

$$e_h = 0,958$$

Como não se dispõe de dados de ensaios de autopropropulsão para o cálculo da eficiência relativa rotativa (er), adotou-se para este parâmetro, como recomendação de Todd (1967), o valor de 0,985. Para a eficiência de transmissão (et), considerando o uso de redutor, adotou-se o valor de 0,97.

Com os valores da eficiência do casco, da eficiência relativa rotativa e da eficiência do hélice em água aberta, obtêm-se o coeficiente quase-propulsivo (mp), cujos valores são apresentados na tabela 5.4 para a faixa de velocidades considerada.

Na tabela 5.4 são reproduzidos os valores da potência efetiva mostrados na tabela 5.2. Com os valores de potência efetiva e coeficiente quase-propulsivo obtêm-se, através da equação 2.19, a potência entregue ao hélice (Pd), cujos valores para as diferentes velocidades são também incluídos na tabela 5.4.

Com a potência entregue ao hélice e a eficiência de transmissão, utiliza-se a equação 2.20 para obter a potência da máquina (P_B); os resultados são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Parâmetros e valores para cálculo da potência da máquina

VELOC. (NÓS)	e_o	η_D	P_E (HP)	P_D (HP)	P_B (HP)
7	0,555	0,524	109,45	208,99	215,45
10	0,564	0,532	306,14	575,23	593,02
15	0,660	0,623	1054,55	1693,25	1745,62
20	0,642	0,606	2935,39	4845,39	4995,25
25	0,700	0,661	7200,51	10900,93	11238,07
28	0,707	0,667	9597,32	14385,63	14830,54
30	0,716	0,676	10849,83	16058,62	16555,28
32	0,724	0,683	12023,55	17599,18	18143,48
34	0,730	0,689	13574,25	19705,67	20315,13
35	0,732	0,691	14426,95	20886,31	21532,28
36	0,734	0,693	15322,30	22122,09	22806,28
37	0,736	0,695	16262,98	23416,42	24140,64

5.1.4 AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA

Como é mostrado na tabela 5.4, para o navio conseguir atingir a máxima velocidade de 37 nós, a instalação propulsora deveria desenvolver uma potência de 24140,64 HP. Porém, como mencionado no capítulo 4, a instalação propulsora atual só consegue desenvolver com seus 4 motores diesel uma potência máxima de 24000 HP. Consta-se, em uma primeira análise, que a potência requerida para que o navio atinja a velocidade máxima (37 nós) excede um pouco o valor da potência instalada. Isto significa que em condições ideais não existe nenhuma folga de potência para

condições mais severas de mar ou para deterioração do casco. Cabe mencionar que a potência máxima que o motor entrega, diferente da potência máxima contínua, só pode ser fornecida por um intervalo curto de tempo, aproximadamente 30 minutos.

Analisando, ainda em caráter preliminar, os resultados apresentados na tabela 5.4, pode-se afirmar que a corveta "Delfim", utilizando seus 4 motores diesel na potência máxima contínua, pode atingir uma velocidade muito próxima dos 34 nós e na potência intermitente pode atingir uma velocidade entre 35 e 36 nós.

A análise feita acima é apenas preliminar porque não foi feita uma verificação de compatibilidade entre a rotação em que o hélice requer a potência para cada velocidade e a rotação em que o motor disponibiliza esta potência. Este análise é feito a seguir.

5.1.5 AVALIAÇÃO DA SELEÇÃO DO CONJUNTO PROPULSOR

Nesta subseção será analisada se a escolha do conjunto motor-reductor-hélice foi feita de forma adequada. Em princípio, sabe-se que a potência requerida para velocidade de 37 nós em condições médias de casco e mar é praticamente igual à potência máxima do motor. É necessário, no entanto, verificar se existe compatibilidade entre as rotações do hélice e do motor neste ponto.

Para esta análise admite-se que os 4 hélices são perfeitamente iguais, de modo que, todos os hélices que estão operando contribuem com a mesma parcela de empuxo para igualar a resistência aumentada do casco.

Para fazer esta análise serão utilizadas as curvas características dos elementos envolvidos na integração casco-hélice-motor, procedimento que foi explicado no capítulo 2. Para isto, é preciso dispor das curvas características do hélice, além das curvas do casco e do motor que já são conhecidas. Para achar o coeficiente de empuxo (K_T) e o coeficiente de torque do propulsor (K_Q) para diferentes coeficientes

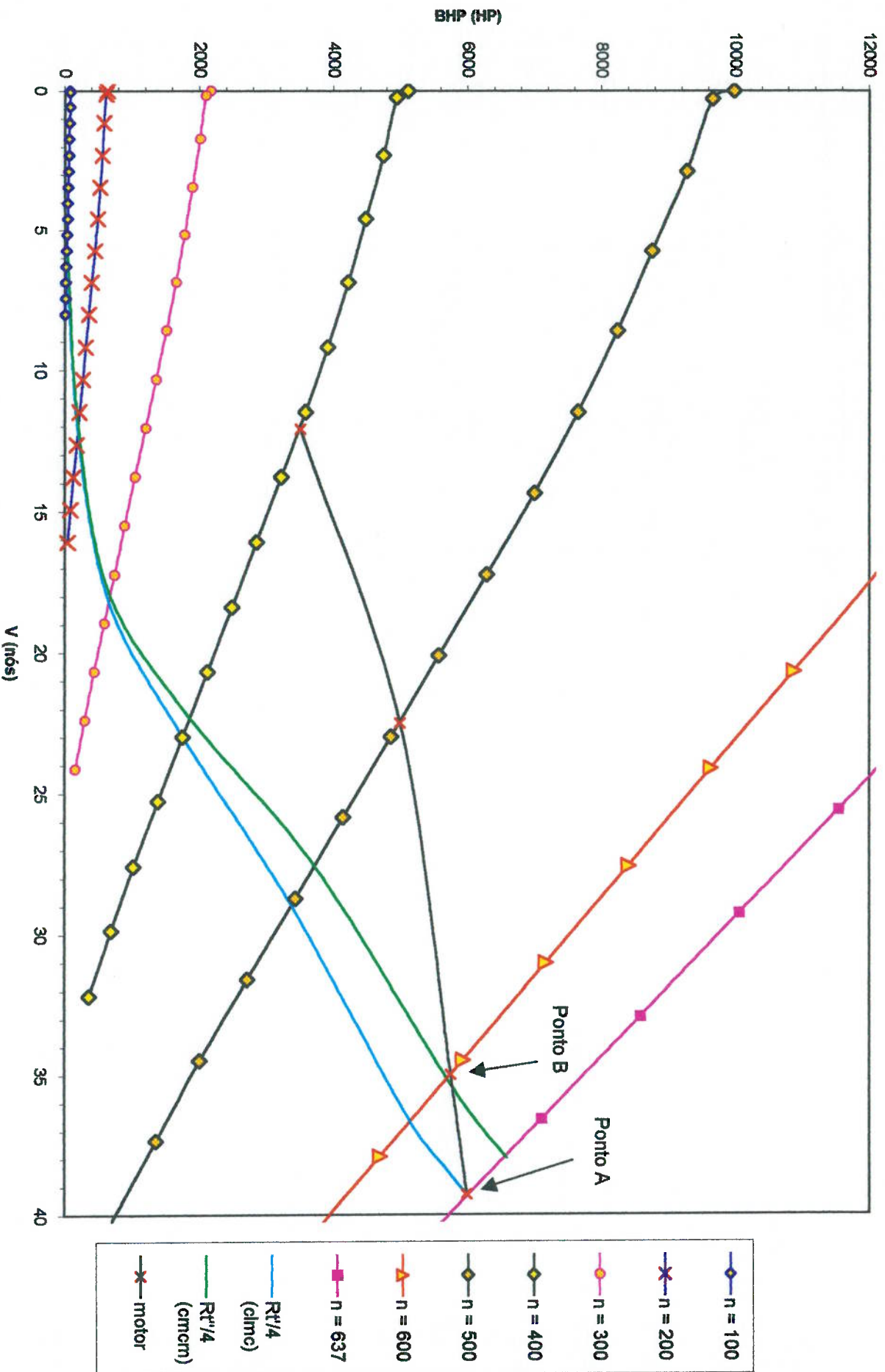


Figura 5.4 - Integração casco-hélice-motor para casco novo

de avanço (J), serão utilizadas as séries polinômiais da série B-Troost, como apresentado no trabalho de Lewis (1988), e cujos valores são mostrados no anexo B.

Conhecidas as curvas características do hélice é possível desenhar a integração casco-hélice-motor como apresentado na figura 5.4. Esta figura mostra que para condições de casco limpo e mar calmo (R_T) o navio atinge uma velocidade máxima aproximada de 39,3 nós, como indicado pelo ponto A, o que permite concluir que o hélice foi escolhido para condições de prova de mar.

Para condições médias de casco e mar (R_T') o navio atinge uma velocidade máxima aproximada de 35,5 nós, como mostrado no ponto B da figura 5.4, devido a que o hélice não consegue absorver a potência máxima do motor.

Foi também examinado o problema da cavitação utilizando as formulações apresentadas no capítulo 2, obtendo-se como resultado que, nas velocidades máxima e de cruzeiro nas condições médias de casco e mar, o hélice apresenta menos de 10% de cavitação, o que representa um valor aceitável.

O projeto do conjunto propulsor não foi adequado, pois o hélice escolhido não absorve a potência máxima do motor, limitando a velocidade máxima do navio. Poderia ter sido utilizado um hélice de passo menor ou uma razão de redução maior. Aparentemente o conjunto propulsor foi selecionado para atingir a máxima velocidade em prova de mar.

5.1.6 A DESCARGA DE GASES SUBMARINA

Como mencionado anteriormente, para evitar a detecção por sensores infravermelhos, a corveta “Deifim” possui, para descarga dos gases do motor, uma saída submarina, a qual tem um diâmetro de 643 mm. e cujo centro está localizado aproximadamente 400 mm. abaixo da linha de água de 2,3 m. De acordo com provas realizadas no mar, a um deslocamento de 686 toneladas e um calado de 2,7 m., ocorre, durante a partida e operação em vazão do motor, uma contração mínima

na tubulação de descarga de 50 a 60 mbar. Esta contrapressão é prejudicial para o adequado funcionamento do motor.

Um bom sistema de gases de descarga é aquele que tem um mínimo de contrapressão. A contrapressão dos gases de escape para motores turbocarregados é prejudicial já que tende a reduzir a potência da turbina e com isto a pressão do compressor. Com isto há uma redução da vazão de ar através do motor. Ocorre também uma elevação da temperatura dos gases de escape, o que reduz a vida útil das válvulas de escape do motor e dos componentes dos turbocompressores, além de originar um incremento na carga térmica do motor.

Em termos globais, com a descarga de gases submarina, a potência produzida pelo motor fica reduzida e aumentam os problemas de desempenho do turbocompressor em cargas parciais. Para ilustrar em termos qualitativos esta afirmação, é apresentada a figura 5.5 que mostra o esquema simplificado dos sistemas de sobrealimentação e de gases de escape do motor, com a câmara hyperbar e um único turbocompressor.

Utilizando como referência o ciclo termodinâmico de uma instalação de turbina a gás simples de ciclo aberto, que opera no ciclo padrão a ar Brayton, verifica-se que o compressor utiliza uma grande quantidade de trabalho na sua operação, em comparação ao trabalho gerado na turbina. A potência utilizada no compressor pode representar de 40 a 80 % da potência desenvolvida na turbina e o resto é entregue como potência útil do ciclo. Porém, no caso de um turbocompressor, o compressor utiliza a totalidade da potência desenvolvida pela turbina.

Excluindo do esquema da figura 5.5 a parte correspondente ao motor diesel, e observando que o sistema resultante atua de forma semelhante a um ciclo de turbina a gás simples, pode-se representá-lo em um diagrama T-s, como é apresentado na figura 5.6; pode-se, então, mostrar a inconveniência da descarga de gases submarina.

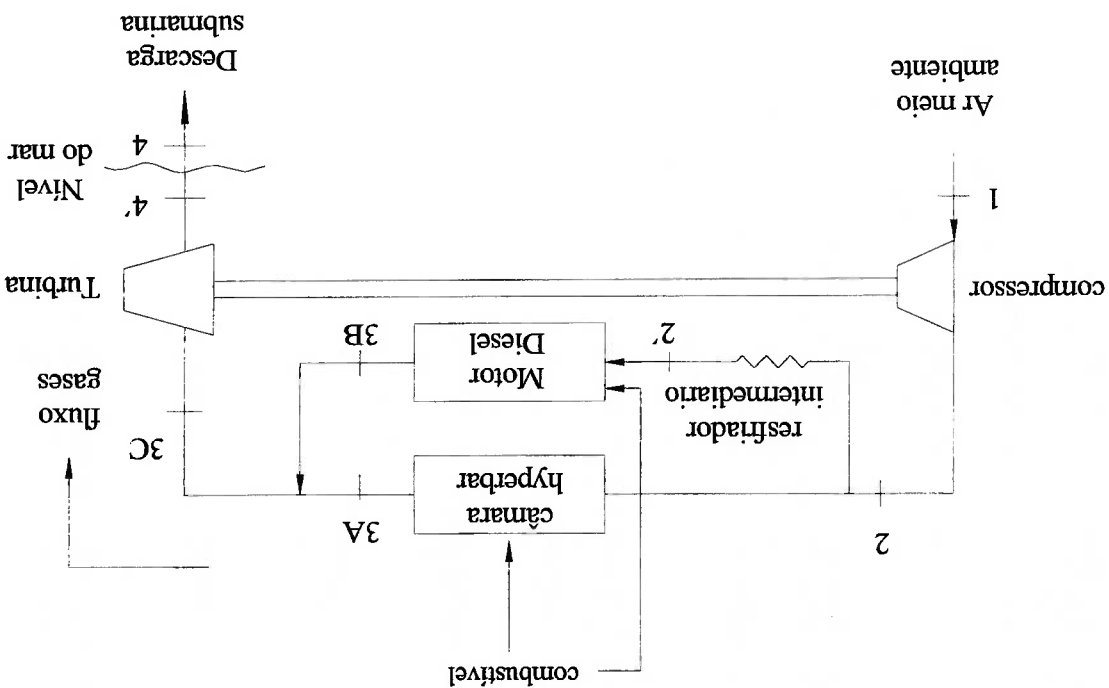


Figura 5.5.- Diagrama simplificado do sistema de sobrealimentação e gases de descarga do motor

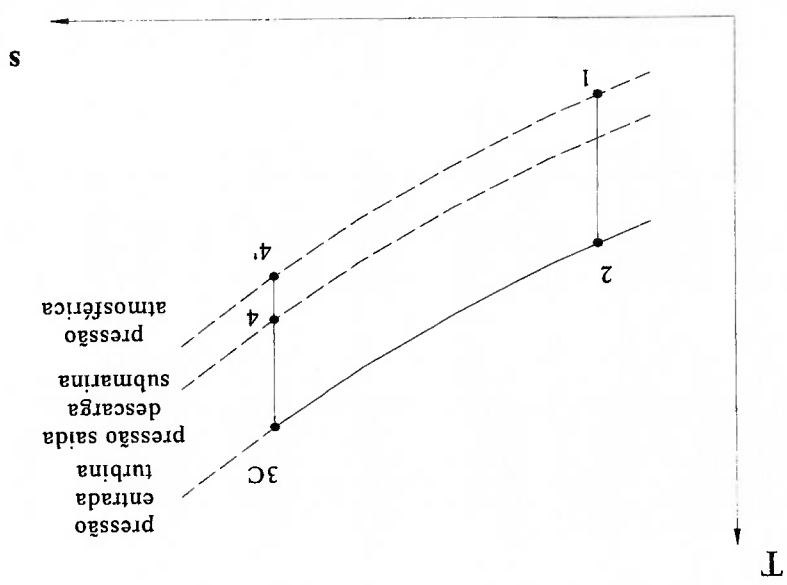


Figura 5.6.- Diagrama T-s do ciclo padrão a ar Brayton

Como pode-se observar na figura 5.6, o trabalho ideal (isentrópico) da turbina quando os gases de escape são descarregados ao mar é representado por :

$$W_{t1} = (h_3 - h_4) \quad (5.1)$$

Se os gases de escape fossem descarregados ao meio ambiente, o trabalho da turbina seria dado por :

$$W_{t2} = (h_3 - h_4') \quad (5.2)$$

Portanto, isto permite determinar que :

$$W_{t1} > W_{t2} \quad (5.3)$$

Como a contrapressão é prejudicial para o desempenho do motor, e o trabalho desenvolvido pela turbina seria maior se os gases de escape fossem descarregados ao meio ambiente, a questão da descarga submarina deveria ter sido cuidadosamente examinada na fase de projeto. Assim, seria possível verificar se o motor teria problemas para absorver a carga do hélice em baixas rotações já que nesta condição a energia dos gases de descarga não é suficiente para acionar os turbocompressores.

Para melhorar o desempenho do motor em baixas rotações, é recomendável modificar o sistema de descarga de gases, incorporando uma ramificação para descarga à atmosfera. Esta ramificação, que seria dotada de um sistema de resfriamento para baixar a temperatura dos gases de escape e reduzir a níveis satisfatórios o risco de detecção por sensores infra-vermelhos, deveria ser utilizada na partida do motor. Em condições de operação permanente deve ser utilizada a descarga submarina.

5.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

5.2.1 EXAME DAS CONDIÇÕES DE ACOPLAMENTO

Como mencionado no capítulo 4, o motor em baixas rotações não fornece potência suficiente para acionar o hélice na condição de acoplamento. Cabe, então, examinar, de um lado, as condições de operação do motor e, de outro lado as exigências de potência do hélice.

Um parâmetro utilizado para medir o desempenho de motores é a pressão média efetiva (p.m.e). Este parâmetro corresponde ao valor da pressão constante que atuando sobre o pistão no curso de expansão produziria o trabalho líquido por ciclo do motor.

Para um motor de quatro tempos, segundo Brinati, H. (1979), a potência pode ser expressa da seguinte maneira :

$$Potência = (p.m.e) A.L.Z \cdot \frac{2}{N} \quad (5.4)$$

onde :

A é a área do êmbolo;

L é o curso do êmbolo (distância de PMS a PMI);

Z é o número de cilindros do motor;

N é a rotação do motor (número de rotações por unidade de tempo); o fator 2 aparece porque são necessárias duas rotações do eixo para que se produza um tempo de expansão (curso de trabalho).

Neste trabalho, para calcular a pressão média efetiva na mínima rotação, é utilizada a seguinte relação, baseada na equação 5.4 :

$$\frac{(Pot)_{min.}}{(Pot)_{min.}^{proj.}} = \frac{(pme)_{min.}}{(pme)_{min.}^{proj.}} \cdot \frac{N_{min.}}{N_{min.}^{proj.}} \quad (5.5)$$

Como indicado no capítulo 4, a pressão média efetiva do motor durante o desenvolvimento da potência máxima contínua (5000 HP a 1350 RPM) é de 20,5 Kg/cm^2 . De acordo com os dados do fabricante, o motor 240 V16-EDS na mínima rotação de regime permanente entrega uma potência máxima de 450 HP. Este ponto de operação, rotação igual a 500 RPM e potência igual a 450 HP, corresponde, segundo 5.5, a uma pressão média efetiva no freio de 4,98 Kg/cm^2 , o que representa apenas 24,29% do valor da pressão média efetiva de projeto. Este valor indica uma tração bem baixa do valor da pressão média efetiva de projeto (valores típicos são da ordem de 30% do valor de projeto), o que mostra uma deficiência de operação do turbocompressor nesta condição.

Para calcular a potência que o hélice requer na condição de acoplamento, precisa-se determinar o torque (Q) do hélice nesta condição; para obter esta variável determina-se o coeficiente de torque do propulsor (K_Q) para um coeficiente de avanço (J) igual a zero, ou seja quando o navio está parado.

Com a finalidade de conferir os dados das curvas de desempenho do hélice, obtidos na seção 5.1 por meio das séries polinômiais da série B-Troost, é utilizado nesta seção, um software da “*United Ship Design and Development Center*” que permite, para um dado hélice da série B-Troost, obter os valores de coeficiente de torque do propulsor (K_Q) assim como do coeficiente de empuxo (K_T) para diferentes coeficientes de avanço (J).

Na tabela 5.5, são mostradas as variáveis solicitadas pelo software e os dados característicos do hélice que foram fornecidos para fazer os cálculos. Em relação ao item potência efetiva, é utilizado o valor obtido no programa “Autopower” para a velocidade de serviço.

Os resultados do teste, apresentados na tabela 5.6, são equivalentes com os resultados obtidos na seção 5.1, cujos valores são também incluídos nesta tabela. Com base nestes resultados, foram desenhadas as curvas características do hélice, como o coeficiente de torque do propulsor (K_Q) e o coeficiente de empuxo (K_T) em função do coeficiente de avanço (J), como é apresentado na figura 5.7.

Tabela 5.5.- Características utilizadas para avaliar o desempenho do hélice

NÚMERO DE PÁS, "Z" (2 - 7)	4
RAZÃO ÁREA EXPANDIDA-ÁREA DO DISCO (0,3 - 1,05)	1,05
DIÂMETRO DO HÉLICE, "D" (PÉS)	5,412
VELOCIDADE DO NAVIO, "V" (NÓS)	25
POTÊNCIA EFETIVA POR EIXO (HP)	1565
1 - t	0,8912
1 - w	0,96
CENTRO DO HÉLICE À SUPERFÍCIE DA ÁGUA, (PÉS)	6,19
RAZÃO PASSO-DIÂMETRO, P/D (0,5 - 1,4)	1,4

Tabela 5.6 - Resultados do software de aplicação de séries polinomiais

J	K _I	K _O	Erro (η _o)	K _I	K _O
0,00	0,755	0,154	0	0,755	0,154
0,10	0,711	0,143	0,079	0,711	0,145
0,20	0,669	0,135	0,157	0,669	0,137
0,30	0,623	0,127	0,234	0,623	0,129
0,40	0,573	0,118	0,31	0,573	0,120
0,50	0,520	0,108	0,384	0,520	0,109
0,60	0,465	0,097	0,457	0,464	0,098
0,70	0,408	0,086	0,527	0,407	0,088
0,80	0,350	0,075	0,593	0,349	0,077
0,90	0,292	0,064	0,654	0,291	0,065
1,00	0,234	0,053	0,706	0,232	0,054
1,10	0,177	0,042	0,743	0,175	0,043
1,20	0,122	0,031	0,751	0,120	0,032
1,30	0,069	0,021	0,687	0,067	0,022
1,40	0,018	0,011	0,374	0,015	0,012

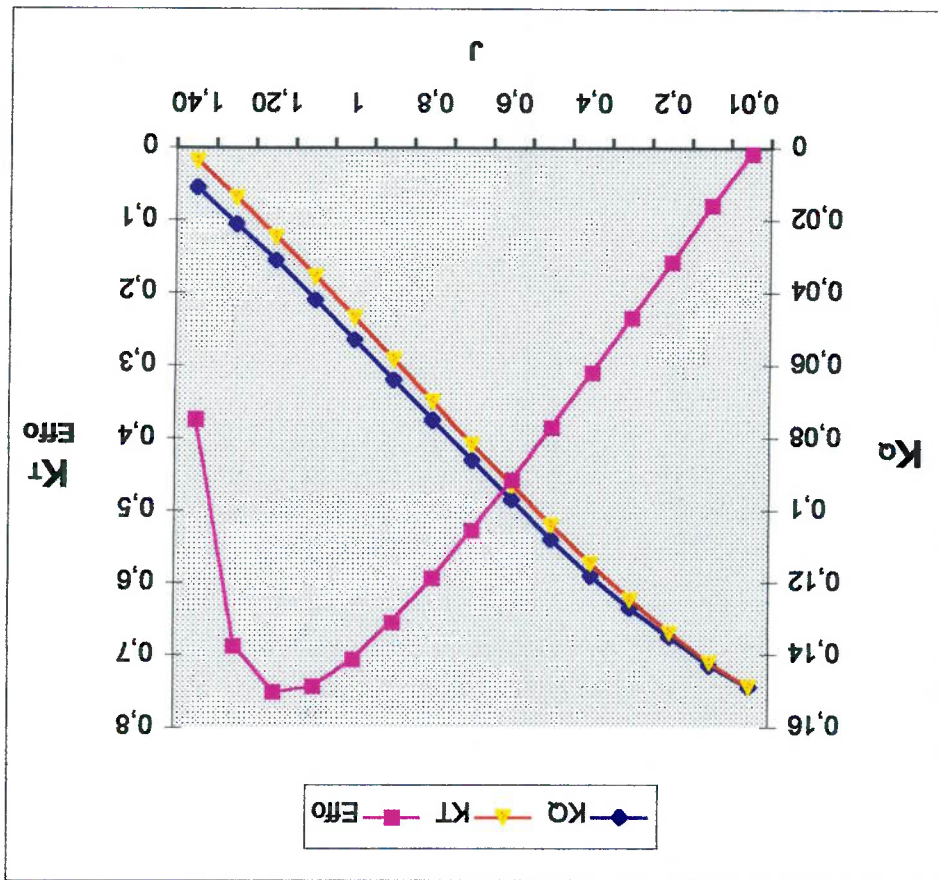


Figura 5.7.- Curvas características $K_Q - K_T - Efto (\eta_0)$ do hélice

Com os resultados apresentados na tabela 5.6, é possível calcular a potência que o hélice absorve no momento de acoplamento com o motor em rotação mínima para isto será utilizada a seguinte formulação :

$$\dot{Q}_0 = K_{\dot{Q}} n^2 D^5 \rho \tag{5.6}$$

$$P_D = 2 \pi n \frac{\dot{Q}_0}{e_r} \tag{5.7}$$

onde :

P_D é a potência entregue ao hélice;

ρ é a densidade da água de mar (kg/m^3);

n é a rotação do hélice (rpm);

e_r é a eficiência relativa rotativa.

Utilizando-se os valores conhecidos de K_Q , n , D , e adotando para a densidade um valor de $1025,86 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$, obtém-se :

$$Q_0 = 26450,38 \text{ N.m}$$

$$P_D = 624,28 \text{ Kw} = 848,77 \text{ HP}$$

Considerando uma eficiência de transmissão (e_t) de 0,97, a potência requerida do motor nesta condição é de 875,02 HP, portanto muito maior que a potência disponível.

Cabe mencionar que o turbocompressor nesta condição de mínima rotação não é auto-suficiente. Não há, nesta condição de operação, energia suficiente nos gases de descarga para acionar o turbocompressor na rotação requerida para manter o fluxo de ar necessário. Isto é, não é possível atender a demanda de pressão de alimentação do motor.

Pode-se, então, concluir que o desempenho insatisfatório do motor em baixas rotações não permite efetuar o acoplamento com o hélice. Isto poderia ter sido detectado durante a fase de projeto.

Pode-se resolver o problema de acoplamento utilizando-se um hélice de passo menor que apresente um menor torque resistente, cujo valor, devidamente corrigido para a rotação do motor, seja inferior ao torque do motor.

Aplicando-se o procedimento acima verifica-se que, com uma razão $P/D = 1,0$, a potência requerida pelo hélice é de 442 HP, menor portanto que a potência fornecida pelo motor, 450 HP.

Assim, usando o hélice de razão $P/D = 1,0$ seria possível efetuar o acoplamento do sistema propulsor sem a necessidade de incorporar ao motor a câmara hyperbar.

5.2.2 CONSEQÜÊNCIAS DO USO DA CÂMARA HYPERBAR

Como mencionado no capítulo anterior, com o decorrer dos anos de serviço do navio e devido às altas temperaturas produzidas pela queima de gases de reforço na câmara hyperbar, a instalação propulsora da corveta começou apresentar deficiências que afetaram seu desempenho. Fadiga do material do sistema de descarga do motor e das palhetas da turbina do turbocompressor, alto risco de incêndio nas praças de máquinas, diminuição do intervalo de manutenção do motor e turbocompressores, bem como, aumento do consumo de combustível, são os principais problemas apresentados.

Como parte da análise de desempenho da instalação propulsora, será abordado nesta seção, o problema referente ao consumo de combustível. Como mencionado no capítulo 4, durante a operação do motor propulsor em baixas rotações é necessário o uso da câmara hyperbar, a qual, segundo dados do fabricante, tem um consumo médio de 170 Kg/hr.

O dado apresentado pelo fabricante indica um consumo relativamente alto de combustível mas, para uma avaliação mais precisa, é necessário calcular o consumo específico da câmara hyperbar e compará-lo com o consumo específico de combustível do motor, para assim determinar o aumento no consumo de combustível do navio. Para esta estimativa será considerada a potência média que o motor fornece durante o uso da câmara hyperbar. A câmara é utilizada entre as 500 e 900 rpm do motor, o que corresponde a uma faixa de velocidade entre 9,5 e 19,4 nós.

De acordo com informação do fabricante, sabe-se que para 500 rpm o motor fornece uma potência de 450 HP, e que nessas condições, com 2 hélices operando o navio em regime permanente se desloca a uma velocidade de 9,5 nós.

Por outro lado, utilizando-se o diagrama da série sistemática do hélice (ou a sua representação polinomial), pode-se determinar que, para velocidade do navio de 19,4 nós e rotação do hélice de 401 rpm, que corresponde a um coeficiente de avanço $J = 0,841$, o torque do hélice em água aberta é de 39,8 KN.m. Considerando os dados da eficiência relativa rotativa e da eficiência de transmissão, chega-se à potência requerida do motor, cujo valor é de 2347,13 HP.

Portanto, a potência média fornecida pelo motor durante o tempo de funcionamento da câmara hyperbar é igual a 1398,56 HP.

O consumo específico de combustível (c.e.c) é dado por :

$$c.e.c = \frac{m_c}{potencia} \quad (5.8)$$

onde :

m_c é a vazão de combustível

Utilizando-se o valor conhecido da vazão média de combustível da câmara hyperbar e a potência média do motor na expressão 5.8, obtêm-se, para o consumo específico de combustível da câmara, o valor de 0,122 Kg/hp-hora.

Com base no diagrama da curva de operação do motor S.A.C.M, apresentado na figura 4.3, verifica-se que o consumo específico de combustível do motor para 2347,13 HP e 900 rpm, sem a câmara hyperbar, é igual a 0,162 Kg/hp-hora.

Mesmo admitindo que, com a inclusão da câmara hyperbar, a injeção de combustível para o motor possa sofrer alguma redução, e isto não está considerado nesta análise, verifica-se que o consumo específico de combustível da instalação propulsora tem um acréscimo de 75,31%. Este fato é totalmente antieconômico pois afeta o custo operacional do navio, além de limitar sua autonomia.

5.2.3 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO INCREMENTO DA RUGOSIDADE NO CASCO DA CORVETA “DELFIN”

Para avaliar o desempenho da instalação propulsora da corveta hoje, quando o navio tem 22 anos de serviço, é preciso considerar a alteração da curva de resistência ao avanço devido ao aumento de rugosidade do casco. Como não se dispõe de dados experimentais, serão utilizadas as formulações apresentadas no capítulo 2 para fazer a estimativa.

Dados necessários do navio:

- Anos de serviço : 22 anos
- Número de docagens : 10
- Comprimento da linha d'água : 59,15m
- Superfície molhada : 528,90 m²
- Velocidade de serviço : 25 nós

- Rugosidade inicial $MAA^{(inicial)} = 150 \mu\text{m}$ (de acordo com a ITTC – 1978)

- Rugosidade por docagens $MAA^{(docagens)} = 14 \mu\text{m/docagem} \times 10 \text{ docagens} = 140 \mu\text{m}$
- Rugosidade por serviço (de acordo com a tabela 2.5) $MAA^{(serviço)} = 2,8 \mu\text{m/mês} \times 264 \text{ meses} = 739,20 \mu\text{m}$

- Rugosidade por incrustações $HRF = 0,1178$ (dado obtido da tabela 2.8)
 $PT = 240 \text{ dias/ano}$
 $CEFF = 1 - [2,72/e^{-z} - 0,24(z-1)^{0,263}]$
 Para $Z = 2$, temos $CEFF = 0,8718$

Substituindo os valores acima nas equações 2.21 e 2.22 obtêm-se os seguintes resultados :

$$MAA^{(custados)} = 542,24 \mu\text{m}$$

$$MAA^{(fundo)} = (0,75)(542,24 \mu\text{m}) = 406,68 \mu\text{m}$$

que conduz a :

$$MAA^{(fouling)} = MAA^{(custados)} + MAA^{(fundo)} = 948,92 \mu\text{m}$$

Como mencionado no capítulo 2, a amplitude aparente média total (MAA) é igual à somatória de:

$$[MAA^{(inicial)} + MAA^{(docagens)} + MAA^{(serviço)} + MAA^{(fouling)}]$$

Portanto, substituindo os valores obtidos na equação acima indicada, obtêm-se o valor total de MAA :

$$MAA = 1978,12 \mu\text{m}$$

Para predizer o incremento da resistência total por efeito da rugosidade do casco, usa-se a equação 2.24, obtendo-se :

$$\Delta C f_{total} = 2,7428 \times 10^{-3}$$

$$\Delta C f_{inicial} = 0,7919 \times 10^{-3}$$

Logo, o coeficiente de incremento de potência efetiva é obtido usando a equação 2.25 e obtêm-se como resultado :

$$C_s = 1,950937 \times 10^{-3}$$

Com este resultado pode-se calcular, através da equação 2.26, o incremento de potência devido à rugosidade do casco para velocidade de serviço :

$$P_{E_{rugosidade}} = 1529,06 \text{ HP}$$

Efetuando o cálculo para outras velocidades do navio, obtêm-se a tabela 5.7, que mostra o aumento da potência efetiva devido ao incremento da rugosidade do

casco.

Tabela 5.7.- Aumento da potência efetiva por incremento da rugosidade

Velocidade (nós)	Potência Efetiva Provas (HP)	Potência Efetiva Rugosidade (HP)	Pot. Efetiva (%) Incremento
35	12545,16	4195,75	16740,91 (33,44%)
30	9434,63	2642,22	12076,85 (28,01%)
25	6261,31	1529,06	7790,37 (24,42%)
20	2552,51	782,88	3335,39 (30,67%)
15	916,99	330,28	1247,27 (36,01%)

O acréscimo de potência efetiva devido ao aumento de rugosidade não é muito grande para este navio porque a resistência de atrito, para o casco novo e máxima velocidade, representa apenas 27% da resistência total, tal como é mostrado no apêndice I.

Para o cálculo da potência requerida da máquina, com o casco nas condições atuais, será considerado o acréscimo da resistência calculado pela fórmula acima. Cabe mencionar que, como indicado no capítulo 2, o incremento de rugosidade reduz a eficiência do hélice em água aberta e aumenta a eficiência do casco, devido ao aumento do coeficiente de esteira. Porém, estes efeitos não serão considerados no trabalho, porque além de ser difícil quantificar as mudanças destes dois coeficientes, os efeitos deles no cálculo do coeficiente quase-propulsivo (η^p) são em sentidos opostos, e assim eles podem se compensar.

5.2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Nesta subseção será examinado o comportamento do sistema propulsor com as variações das condições de projeto, como o aumento de rugosidade do casco após 22 anos de serviço. Para isto, como mencionado no capítulo 2, é necessário efetuar a integração casco-hélice-motor para, assim, determinar como uma modificação das

características de algum destes elementos influí sobre os outros. É utilizado o procedimento gráfico, já usado na seção 5.1, para fazer esta análise.

Na figura 5.8 são apresentadas as curvas de resistência ao avanço aumentadas R_T (casco), e de empuxo do hélice em função da velocidade do navio. São representadas as curvas de resistência para dois condições diferentes do navio, para condições médias de casco e mar (R_T') e após 22 anos de serviço (R_T''). Estas curvas são desenhadas considerando o funcionamento de dois ou quatro eixos.

Na figura 5.9 são apresentadas as curvas de potência requerida pelo conjunto casco-hélice para as condições mencionadas no parágrafo anterior. E também desenhada nesta figura a curva de potência máxima do motor. Utilizando-se esta figura, pode-se examinar as variações de potência e rotação para atingir a velocidade máxima e a velocidade de cruzeiro do navio para as diferentes condições do casco.

Na condição atual (22 anos de serviço), para o navio atingir a velocidade máxima de 37 nós, cada motor deveria fornecer uma potência superior aos 8000 HP a uma rotação do hélice superior às 637 rpm, como indicado pelo ponto A. Isto não é possível, já que o motor está projetado para entregar uma potência máxima de 6000 HP, durante um intervalo curto de tempo, à rotação de 1430 rpm, o que equivale à rotação máxima do hélice de 637 rpm.

Pode-se verificar na figura 5.9 que a máxima velocidade atingida pelo navio, nas atuais condições, é de 30 nós, definida pelo ponto B, intersecção da curva de potência requerida pelo conjunto casco-hélice com a curva de potência máxima do motor. Neste ponto o motor fornece uma potência de cerca de 5500 HP a uma rotação de 1256 rpm (560 rpm do hélice).

Em relação à velocidade de cruzeiro, 15 nós, pode-se avaliar o acréscimo de potência necessário para manter esta velocidade com o casco nas condições atuais. Para o navio se deslocar na velocidade de cruzeiro, na condição de casco limpo e mar calmo utilizando 2 eixos, cada hélice precisava absorver uma potência de 700 HP a

289 rpm, como indicado pelo ponto C. Depois de 22 anos de serviço, para o navio atingir esta mesma velocidade, cada hélice precisa de uma maior potência, cerca de 1260 HP a 320 rpm, como indicado pelo ponto D.

Cabe mencionar que, se o navio utilizasse hélice de passo controlável, teria a possibilidade de diminuir o passo do hélice e com isto conseguir absorver maior potência do motor, atingindo portanto uma maior velocidade.

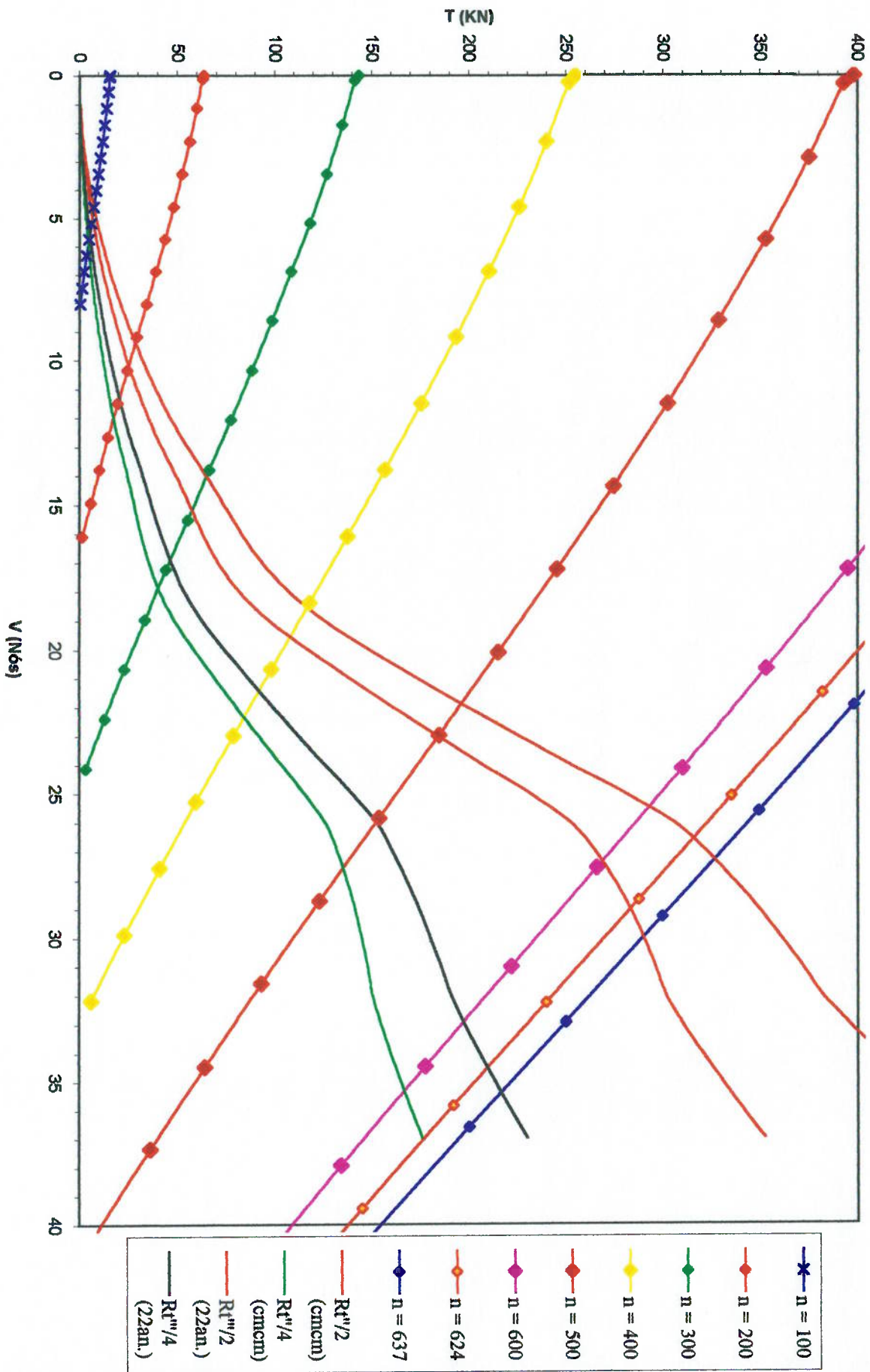


Figura 5.8 - Integração casco-hélice

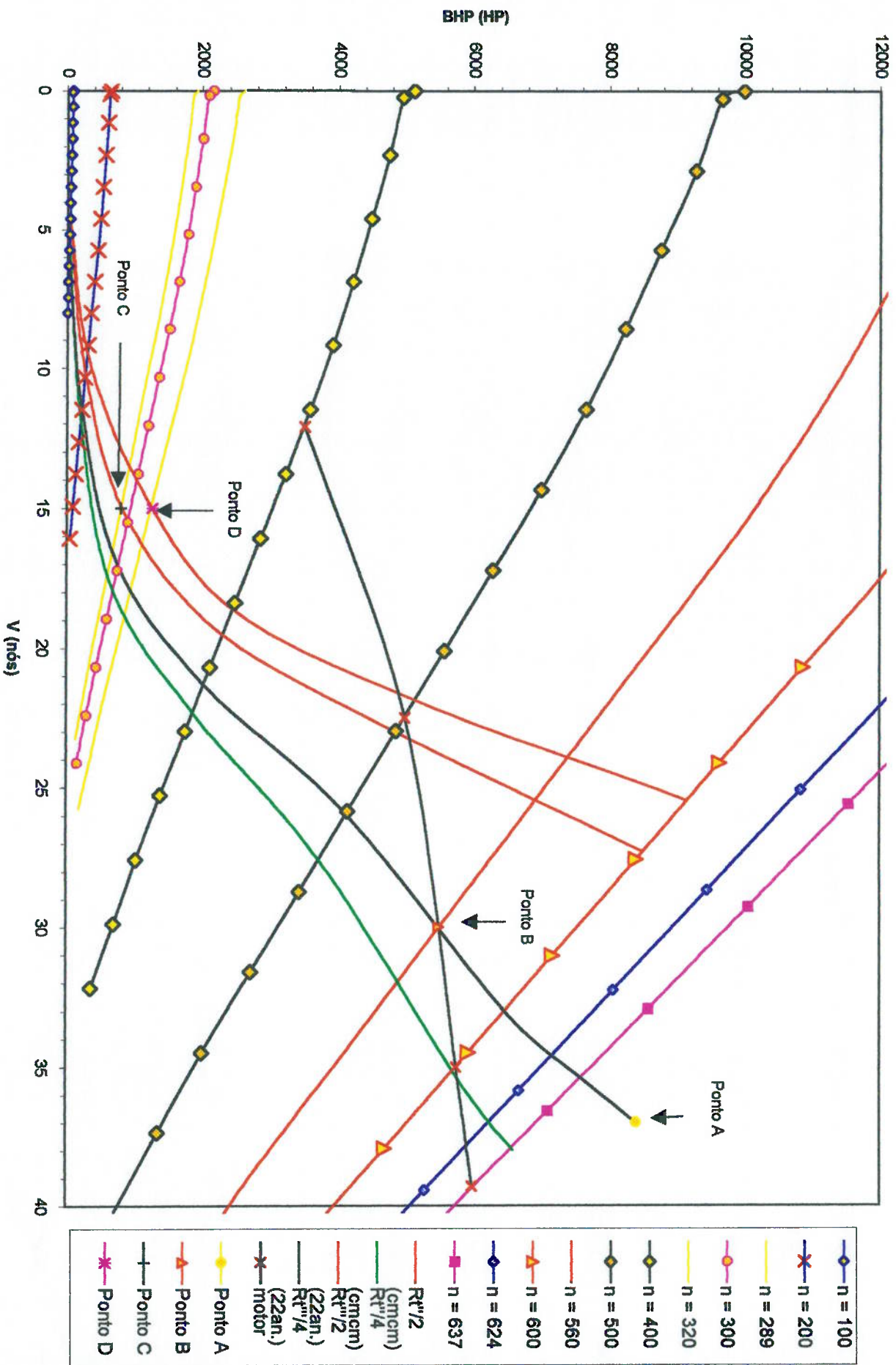


Figura 5.9 - Integração casco-hélice-motor

CAPÍTULO 6

6 PROJETO DE NOVA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Neste capítulo são apresentadas e avaliadas as alternativas de solução para reformar a instalação propulsora da corveta "Delim". Inicialmente é discutida a questão da velocidade máxima que o navio deve atingir na vida útil que ele vai ter, com a finalidade de definir as alternativas que cumpram com o requisito de velocidade escolhido. Depois é calculado o acréscimo da curva de resistência ao avanço para a vida útil desejada do navio, com a finalidade de calcular a potência da máquina necessária para atingir, nessas condições, a velocidade requerida. Em seguida, são apontadas e explicitadas algumas alternativas de solução e são especificados os parâmetros adotados na avaliação das alternativas propostas. Proceder-se, em seguida, à avaliação através da aplicação do método da Matriz de Decisão. Finalmente, são apresentados os resultados da avaliação e selecionada a melhor alternativa de instalação propulsora para a reforma.

6.1 DISCUSSÃO PRELIMINAR DA NOVA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Toda instalação propulsora escolhida como alternativa de solução deve atender de forma prioritária o requisito de não exigir equipamentos adicionais para garantir a propulsão em toda a faixa de velocidade do navio, isto é, não precisar, por exemplo se forem mantidos os motores atuais, da câmara hyperbar. É necessário,

portanto, estabelecer outro parâmetro para definir as alternativas de solução que serão consideradas como propostas de reforma.

Como mencionado no capítulo 4, para a corveta “Delfim” cumprir com seus requisitos de missão, é importante atingir altas velocidades. Então, a questão é saber que velocidade deseja-se que o navio atinja. Atualmente a instalação propulsora da corveta “Delfim” não permite atingir o requisito de velocidade máxima de 37 nós (alias, isto não ocorre nem quando novo), em condições médias de casco e mar.

Com o passar do tempo, como explicado no capítulo 2, há um aumento da rugosidade do casco do navio; em decorrência aumenta a resistência ao avanço e a potência requerida da máquina, para se deslocar nas diferentes velocidades de operação, também aumenta.

Com a finalidade de definir melhor as alternativas de solução da reforma da instalação propulsora da corveta “Delfim”, é conveniente determinar o requisito de velocidade prioritário que se deseja atingir. Para isto, serão considerados 3 grupos de soluções, cada um deles, com um requisito de velocidade máxima a ser satisfeito. Cabe mencionar que, pelas limitações de tempo para desenvolver o trabalho, adotou-se certas hipóteses para definir o campo das alternativas de solução. Assim, por exemplo, fixou-se o diâmetro, o número de pás e a razão de área expandida do propulsor. A seguir são apresentados os grupos de alternativas :

- a) alternativas que procuram manter uma máxima velocidade de 37 nós;
- b) alternativas que garantem uma velocidade máxima de 30 nós;
- c) alternativas que procuram manter a máxima potência dos motores atuais.

Para projetar a nova instalação propulsora, é preciso definir quanto tempo mais de serviço terá o navio. Para este caso, é considerada uma vida útil adicional de 10 anos de operação da embarcação. Então, para calcular a potência requerida da nova instalação propulsora, considerando este incremento de vida útil, é necessário conhecer o incremento da curva de resistência do navio. Para isto, é utilizado o

6.1. procedimento apresentado no capítulo 2, cujos resultados são mostrados na tabela

6.1.

Com estes valores e utilizando os dados conhecidos da eficiência relativa rotativa, eficiência do casco e eficiência do hélice em água aberta, é possível calcular a potência da máquina para diferentes velocidades, cujos resultados são incluídos na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resistência ao avanço e potência da máquina para incremento da vida útil do navio

VELOCIDADE (NÓS)	RESIST. AO AVANÇO (KN)	POTÊNCIA EFETIVA (HP)	POTÊNCIA DA MÁQUINA (HP)
7	30,05	145,26	285,67
10	59,48	410,70	794,79
15	135,85	1407,18	2327,11
20	272,66	3765,70	6402,11
25	509,95	8803,52	13726,81
28	613,18	11856,04	18303,40
30	658,42	13640,11	20792,96
32	698,02	15424,50	23253,27
34	752,36	17664,35	26411,09
35	781,72	18893,51	28171,70
36	812,06	20187,55	30019,20
37	843,43	21549,77	31957,77

Com base nestes resultados, pode-se concluir que, para atingir 37 nós de velocidade, precisa-se de uma potência muito alta, cerca de 32000 HP. Um exame realizado a um catálogo de motores atuais, mostrou que não existem motores de alta rotação, de dimensões apropriadas para este caso, que entreguem esta potência. Portanto, a opção “a”, acima mencionada, não é viável.

Para atingir uma velocidade de 30 nós é preciso projetar a nova instalação propulsora com uma potência instalada da ordem de 21000 HP, como mostrado na tabela 6.1 Um exame de motores disponíveis no mercado mostra que existem alternativas que atendem esta demanda de potência, dentro das limitações de espaço da praça de máquinas.

Com relação ao grupo de alternativas “c”, é possível verificar mediante a figura 5.9, que a velocidade máxima que o navio poderia atingir para frente, considerando que continua com o mesmo hélice de passo fixo, seria menor de 30 nós. De fato, nas condições atuais a embarcação atinge 30 nós absorvendo o hélice uma potência de 5500 HP, e é conhecido que a rugosidade do casco com o passar dos anos tende a aumentar; portanto, a curva de resistência também aumentará. Para o hélice aproveitar a potência máxima do motor, 6000 HP, é preciso diminuir o passo do propulsor, de tal forma que a curva de potência requerida se traslade para a direita, como mostra a figura 6.1, e possa aproveitar melhor a potência do motor.

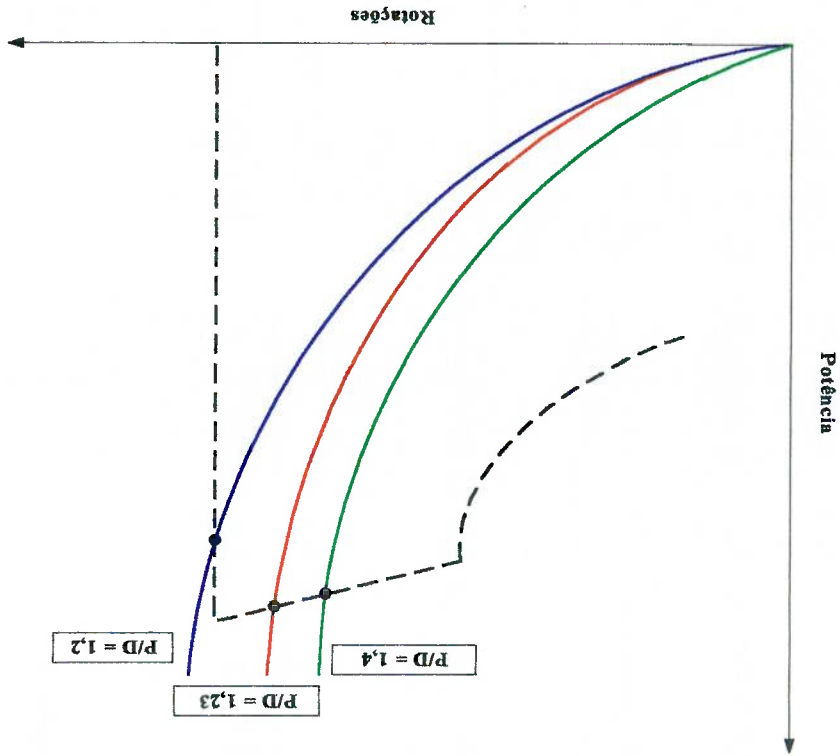


Figura 6.1 – Efeito da diminuição do passo do hélice em relação ao aproveitamento da potência do motor

A figura 6.2 mostra o desempenho da instalação propulsora considerando um hélice de razão P/D 1,2 e um outro hélice de razão P/D 1,23. Esta figura permite determinar que a razão passo-diâmetro que consegue atingir a maior velocidade do navio, 31 nós, aproveitando a máxima potência dos motores atuais, encontra-se entre 1,2 e 1,23.

Pode-se concluir, então, que os grupos de alternativas “b” e “c” são viáveis para definir a nova instalação propulsora da corveta. Desta forma, a análise da nova instalação será feita considerando estes grupos de alternativas.

6.2 ALTERNATIVAS PARA NOVA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Nesta seção serão descritas algumas alternativas de solução para o requisito de velocidade indicado na seção anterior. Cabe mencionar que, ampliando a pesquisa feita no capítulo 3 sobre os navios semelhantes à corveta “Delim”, verificou-se que 57% dos navios que possuem instalação propulsora diesel com 4 eixos, utilizam motores MTTU da série 595. Pode-se interpretar isto como um fato que mostra que esses motores já foram testados e usados durante anos por vários navios de características similares à corveta “Delim” sem problemas. Pode-se, então, utilizar este motor como elemento de referência dentro das alternativas a serem propostas.

É preciso mencionar que, em um primeiro exame, foi considerada entre as alternativas pertencentes ao grupo “c”, aquela que contemplava manter os motores atuais e substituir o hélice por outro hélice de passo fixo com nova razão passo-diâmetro. Mas, como foi constatado na seção anterior, a razão passo-diâmetro que permite que o navio atinja a máxima velocidade é aproximadamente 1,22. No entanto, como foi mostrado no capítulo 5, o motor atual só consegue acoplar ao eixo propulsor, sem a necessidade de utilizar a câmara hyperbar, com um hélice de razão passo-diâmetro igual a 1,0. Portanto, não é possível, com o motor atual e um hélice de passo fixo, cumprir com os requisitos estabelecidos inicialmente.

São descritos, em seguida, as alternativas de solução viáveis para o presente trabalho.

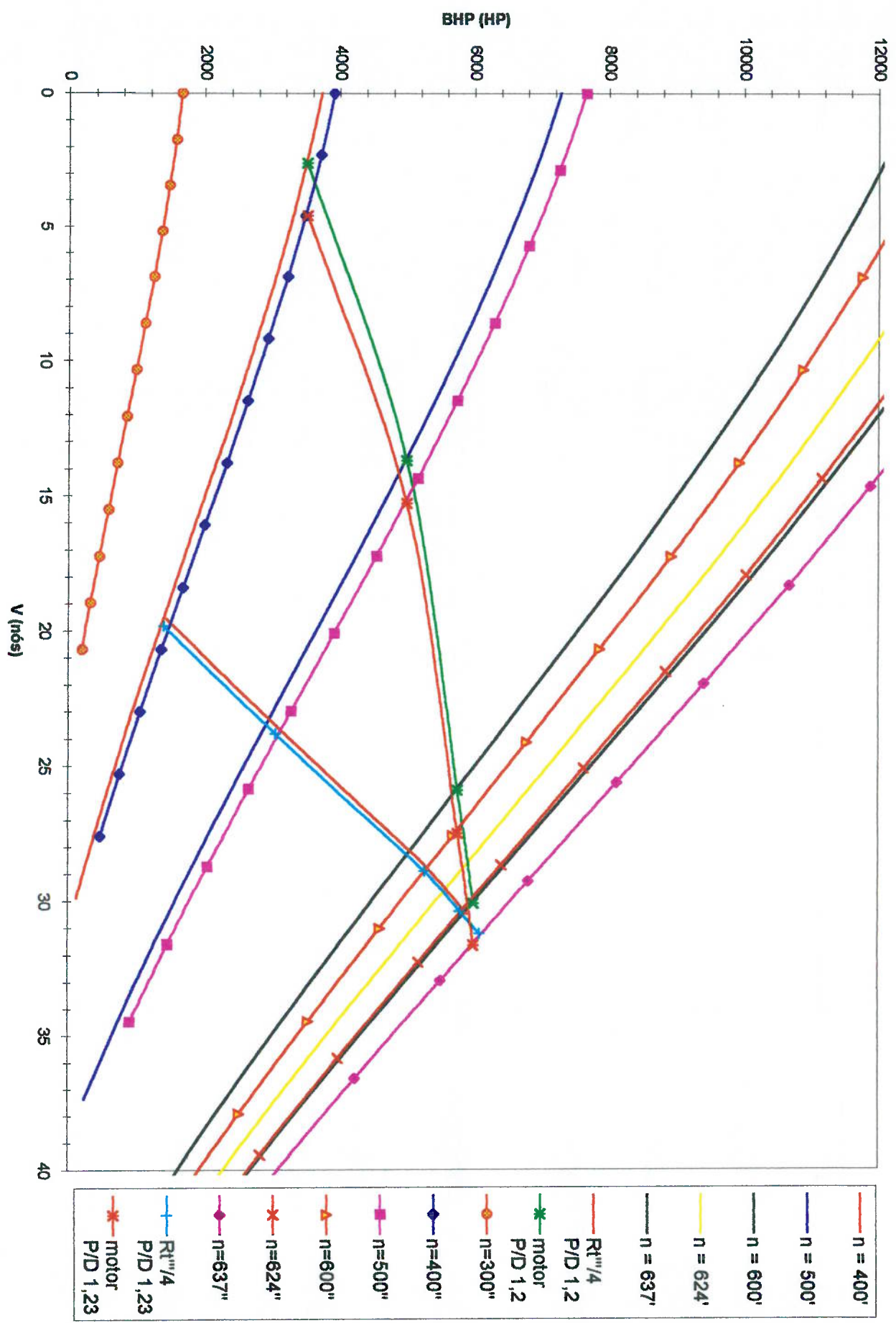


Figura 6.2 - Passo para atingir máxima velocidade

1) Primeira Alternativa (1A) : manter os motores atuais e substituir o hélice de passo fixo por um hélice de passo controlável.

Evidentemente, para esta alternativa, recomenda-se que os motores atuais sejam submetidos a um processo de revisão completa e que se efetuem testes em banco de provas para levantar as curvas efetivas de desempenho do motor.

Como mencionado anteriormente, o hélice de passo controlável tem a vantagem de adequar o passo para diferentes velocidades, com o qual pode-se ajustar às diversas condições operacionais do navio. Por exemplo, diminuindo o passo, o hélice absorve menor potência durante o acoplamento do motor; isto também pode ser feito quando o navio precisa-se deslocar a baixas velocidades para manobrar. Quando a curva de R_T muda, porque houve acréscimo de rugosidade por incrustações, é possível ainda com a variação do passo mudar a curva de potência requerida, ajustando-a à região de operação do motor.

2) Segunda Alternativa (2A) : manter os mesmos hélices de passo fixo e selecionar conjuntos motores-redutores adequados.

Para este caso, uma vez selecionado um motor com a potência requerida, é preciso escolher um redutor com uma razão de redução adequada. É isto que vai definir a velocidade que o navio pode atingir.

Neste caso a análise da alternativa deve incluir, além da verificação do ponto de operação para velocidade máxima, a questão do acoplamento. Isto é, o motor deve fornecer, para rotação de acoplamento, uma potência igual ou superior aos 875 HP, que é a potência exigida pelo hélice.

3) Terceira Alternativa (3A) : mudar os motores atuais e trocar o hélice de passo fixo por hélice de passo controlável.

Esta alternativa é mais flexível que a alternativa anterior em relação à escolha do conjunto propulsor devido ao uso de hélice de passo controlável que, como

mencionado anteriormente, permite mudar o passo aproveitando melhor a região de operação do motor.

6.3 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Uma vez que as alternativas propostas satisfazam o requisito especificado para o acoplamento do motor principal ao eixo propulsor, é necessário definir um procedimento para seleção da melhor solução. Será utilizado neste trabalho a técnica de matriz de decisão que foi exposta no capítulo 2. Assim, inicialmente, serão identificados as características das instalações propulsoras mais significativas para o problema em questão, atribuindo-se um peso relativo para elas. Em seguida, utilizando o julgamento pessoal, serão atribuídas notas, em cada fator considerado, para as diferentes alternativas.

Os critérios de comparação escolhidos são apontados a seguir, sendo que alguns deles já foram comentados no capítulo 2 :

- Atingir a máxima velocidade;
- Menor consumo de potência para velocidade de cruzeiro;
- Menor consumo específico de combustível;
- Custo de reforma da instalação propulsora;
- Facilidades de manutenção;
- Capacidade de manobra;
- Peso da instalação propulsora.

6.3.1 ATRIBUIÇÃO DOS PESOS

Cada característica possui uma certa importância para o sistema, logicamente, umas mais e outras menos. Por isso, é muito importante fazer uma análise dos valores dos pesos que serão atribuídos a cada um dos fatores que foram selecionados como significativos para este sistema propulsor.

Com base na missão da corveta “Delfim”, sabe-se que o navio em algumas circunstâncias precisa operar em sua velocidade máxima. É importante que este valor seja o mais alto possível, já que esta característica é essencial durante uma operação de ataque ou defesa, bem como para se trasladar de uma área de operação para outra durante uma situação de emergência. Considerando que esta característica é muito importante, será atribuído um peso de 0,3.

Apesar do navio precisar atingir em algumas situações altas velocidades, como mencionado no capítulo 3, a maior parte do tempo ele navega a velocidade de cruzeiro, que é uma velocidade econômica para o navio. Por esta razão é importante que a instalação propulsora consuma menor potência para atingir esta velocidade; como consequência, ela consumirá menor quantidade de combustível e portanto a embarcação atingirá um maior raio de ação. A esta característica será atribuído um peso de 0,1.

A característica consumo específico de combustível é um fator de importância considerável, pois além de aumentar os custos operacionais da embarcação, irá gerar problemas de acomodação dos tanques pois, quanto maior o consumo, maiores deverão ser os reservatórios de combustível. Isto implica adicionalmente maior peso para a embarcação e menor espaço disponível para a instalação de outros equipamentos. Esta característica receberá, então, o peso de 0,1.

O custo da instalação propulsora também deve receber um peso significativo nesta análise; como a reforma deste navio depende de verbas públicas, o custo não deverá exceder limites impostos pelo Estado Maior da Armada. Porém, deve-se ter bem claro que não adianta reformar um navio com equipamentos de baixa qualidade somente para economizar no processo de reforma da embarcação. Sabe-se que as manutenções posteriores acabam gerando prejuízos muito maiores. Sistemas bem projetados e que atendam às reais necessidades da embarcação evitam superdimensionamento e excessos desnecessários. Então, para esta característica será atribuído o peso de 0,2.

Uma outra característica de grande importância para o sistema é o nível de manutenção exigida. Um problema muito comum é de prejuízos muitos elevados é a necessidade de reparos constantes na instalação propulsora. Em geral, ao se parar um navio para uma manutenção, além de se gastar com peças, docagem no estaleiro e custos de mão de obra especializada, existe o prejuízo, talvez maior, de não se cumprir as operações programadas e não se dispor da embarcação para situações de emergência. Por isso equipamentos de menor complexidade e de baixa manutenção devem ser privilegiados no processo de escolha. Esta característica receberá um peso de 0,2.

A capacidade de manobra é outro fator de importância para o bom funcionamento do navio, pois esta embarcação deve ter capacidade de se manter bem posicionada num determinado rumo para realizar operações de reabastecimento no mar e operações com helicópteros, bem como para navegar entre acidentes geográficos do litoral para fazer defesa de um ponto estratégico. Essa capacidade, porém, não depende somente do tipo de instalação propulsora, depende também da maquinaria de leme, formas de casco e apêndices. Por isso não se deve atribuir um peso muito significativo a esta característica, na escolha da instalação propulsora. Decide-se assim atribuir um peso de 0,05.

A característica peso da instalação propulsora é importante na medida que, a exemplo do que foi discutido em consumo de combustível, ela pode aumentar o deslocamento do navio ou reduzir a possibilidade de instalação de outros equipamentos. Nota-se que, entre as opções possíveis todas atendem, de certa forma, satisfatoriamente às necessidades da embarcação; por isso esta característica receberá um peso menos significativo, que será de 0,05.

A tabela 6.2 apresenta a listagem por ordem de importância e os pesos atribuídos a cada característica.

Tabela 6.2 – Atribuição de pesos aos critérios de comparação

CARACTERÍSTICAS	PESOS
Atingir a máxima velocidade	0,30
Facilidades de manutenção	0,20
Custo de reforma da instalação propulsora	0,20
Menor consumo específico de combustível	0,10
Menor consumo de potência para veloc.cruzeiro	0,10
Capacidade de manobra	0,05
Peso da instalação propulsora	0,05

6.3.2 ATRIBUIÇÃO DAS NOTAS

Nesta seção é apresentado um estudo das notas atribuídas a cada uma das alternativas de instalação propulsora selecionada, de acordo com cada uma das características indicadas. As notas atribuídas juntamente com os pesos já definidos anteriormente possibilitarão a construção da matriz de decisão.

Como mencionado no capítulo 2, as características a serem analisadas podem ser classificadas como mensuráveis e não mensuráveis. No primeiro grupo estão incluídos : custos, peso da instalação propulsora, consumo específico de combustível, atingir a máxima velocidade e menor consumo de potência para velocidade de cruzeiro. No segundo grupo estão consideradas as seguintes : facilidades de manutenção e capacidade de manobra.

- CUSTOS

Alternativa 1A :

- 04 hélices de passo controlável (Fonte France Hélices).....USD 1'120.000,00

- manutenção integral 04 motores S.A.C.M.....USD 220.000,00

Alternativa 2A :

- 04 motores MTU 16V595 e correspondentes redutores

(Fonte MTU Friedrichshafen).....USD 3 200.000,00

Alternativa 3A :

- 04 motores MTU 16V595 e correspondentes redutores....USD 3 200.000,00

- 04 hélices de passo controlável.....USD 1 120.000,00

Para atribuição de notas a esta característica adotou-se como premissa atribuir nota máxima à alternativa de menor custo. As notas das demais alternativas são inversamente proporcionais ao custo. Obteve-se, então, os resultados mostrados na tabela abaixo.

Tabela 6.3 – Notas para o fator custos

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	100%
2A	42%
3A	31%

• PESO DA INSTALAÇÃO PROPULSORA

Serão utilizados como parâmetros para avaliação desta característica o peso dos equipamentos que fazem parte de cada instalação propulsora. Será atribuída nota máxima à instalação com menor peso.

- Motor S.A.C.M.....19000 Kg.
- Motor MTU 16V595 (Fonte MTU).....14200 Kg.
- Hélice de passo fixo (Fonte France Hélices).....765 Kg.
- Hélice de passo controlável (com equipamentos adicionais).....1500 Kg.

De acordo com os valores apresentados, foi feito o cálculo do peso de cada instalação propulsora chegando-se aos resultados que foram transformados em notas.

Tabela 6.4 – Notas para o fator peso da instalação propulsora

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	72%
2A	100%
3A	94%

- CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

Os valores do consumo específico de combustível fornecidos pelos fabricantes dos motores mostram que, para a velocidade de cruzeiro do navio, existe uma pequena diferença no consumo. (motor S.A.C.M. 212 gr/kW-hr e motor MTU 210 gr/kW-hr). Com base nestes dados serão atribuídas as respectivas notas, mostradas na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Notas para o fator consumo específico de combustível

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	99%
2A	100%
3A	100%

- ATINGIR MÁXIMA VELOCIDADE

Como mencionado na subseção anterior, a corveta precisa atingir altas velocidades para cumprir com determinados requisitos operacionais, portanto é necessário conhecer qual das alternativas permite alcançar a maior velocidade possível. Para atribuir nota às alternativas, foi feito o cálculo da velocidade máxima que cada instalação propulsora proporciona ao navio. Para este cálculo foi

empregada a curva de resistência do casco para 22 anos, utilizada no capítulo 5. Embora o mais adequado fosse o uso da nova curva de resistência (27 anos), em termos relativos os resultados serão muito próximos.

Os valores obtidos foram os seguintes :

Alternativa 1A	$V_{MAX} = 31$ nós
Alternativa 2A	$V_{MAX} = 32$ nós
Alternativa 3A	$V_{MAX} = 32$ nós

Tabela 6.6 – Notas para o fator máxima velocidade

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	97%
2A	100%
3A	100%

- MENOR CONSUMO DE POTÊNCIA PARA VELOCIDADE DE CRUZEIRO

Empregando a figura 5.4 e a figura 5.9, calculou-se a potência que absorve o navio para se deslocar na velocidade de cruzeiro para cada alternativa. Os valores são os seguintes : 1A consome 1240 HP, enquanto 2A e 3A consomem 1260 HP cada.

Tabela 6.7 – Notas para o fator menor consumo de potência para velocidade de cruzeiro

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	100%
2A	98%
3A	98%

• FACILIDADES DE MANUTENÇÃO

Os motores diesel em geral oferecem maior simplicidade no processo de manutenção quando comparados com outras máquinas principais de propulsão. No caso dos motores S.A.C.M. 240, apesar de ter poucas horas de trabalho (menos de 5500 horas), mas por causa do uso da câmara hyperbar, requerem de manutenção para recuperar suas condições ótimas de operação. Como mencionado no capítulo 4, este motor é protótipo e antigo, portanto, é difícil se obter peças de reposição. Além disso, o fabricante do motor já não existe.

No caso de trocar os motores S.A.C.M. por motores MTU 16V595, se teriam instalados motores mais modernos, que inicialmente requereriam de um baixo índice de manutenção, aliás de ser motores de um fabricante vigente e com facilidade de obter peças de reposição.

Em relação ao elemento propulsor, o hélice de passo controlável requer manutenção e mão de obra mais especializada que o hélice de passo fixo.

A tabela 6.8 mostra as notas atribuídas para esta característica.

Tabela 6.8 – Notas para o fator facilidades de manutenção

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	50%
2A	100%
3A	90%

• CAPACIDADE DE MANOBRA

A corveta “Delim” necessita de uma grande capacidade de manobra; no entanto, como apontado no capítulo 3, a capacidade de manobra é um fator que depende só parcialmente do sistema de propulsão. Os hélices de passo controlável oferecem, neste caso, vantagens sobre os hélices de passo fixo, como, por exemplo, não precisar de reversor para marcha a ré, mudar de velocidade sem alterar as

rotações do eixo propulsor (em uma faixa de velocidades) e até colocar um passo onde o empuxo é nulo. Com base nestas considerações apresenta-se a tabela 6.9, com as notas atribuídas a cada alternativa.

Tabela 6.9 – Notas para o fator capacidade de manobra

ALTERNATIVAS	NOTAS
1A	100%
2A	90%
3A	1000%

6.3.3 MATRIZ DE DECISÃO

Na seção anterior foram examinados os méritos e deficiências das 3 alternativas propostas como possíveis soluções, em relação aos fatores escolhidos para comparação das instalações propulsoras. As tabelas 6.3 a 6.9, preparadas para sintetizar a avaliação feita, podem ser utilizadas, juntamente com os pesos definidos para cada característica, para contribuição da matriz de decisão conforme explicitado no capítulo 2.

A tabela 6.10 apresenta a matriz de decisão preparada com base nas avaliações efetuadas.

Tabela 6.10 – Matriz de decisão

Critérios	Alternat. Peso						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,05	0,2	0,05
2	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%
3	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%
4	100%	98%	100%	42%	100%	100%	100%
5	97%	100%	99%	100%	72%	70%	100%
6	100%	100%	100%	100%	94%	90%	100%
7	91,6%	87,7%	91,6%	87,7%	83,7%	87,7%	83,7%

6.4 ESCOLHA DA NOVA INSTALAÇÃO PROPULSORA

1. Atingir a máxima velocidade;
2. Menor consumo de potência para velocidade de cruzeiro;
3. Menor consumo específico de combustível;
4. Custo de reforma da instalação propulsora;
5. Peso da instalação propulsora;
6. Facilidades de manutenção;
7. Capacidade de manobra.

onde :

A tabela 6.10 mostra os valores finais da aplicação do método da matriz de decisão. Obtém-se como resultado que a alternativa 1A, que propõe manter os motores atuais e substituir o hélice de passo fixo por um hélice de passo controlável, é escolhida como a melhor opção para efetuar a reforma da instalação propulsora da corveta “Delim”. Para isto, como mencionado anteriormente, é necessário fazer passar os motores S.A.C.M. 240 V16-EDS por um processo de revisão total.

Cabe mencionar que em relação aos sistemas 1A e 2A a diferença é pequena para caracterizar uma preferência significativa de uma em relação a outra. Seria interessante que se proceda uma consulta aos especialistas para conferir se a escolha é a mais adequada.

A tabela 6.10 mostra também que o critério que determina a maior diferença percentual entre as alternativas é o custo da reforma. Portanto, considera-se importante que a avaliação seja efetuada mudando os critérios de escolha, agrupando os fatores econômicos num único fator, para comparar os resultados.

É preciso verificar que o hélice escolhido fique livre do problema de cavitação.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta, inicialmente, um resumo do trabalho desenvolvido para, em seguida, apontar as principais conclusões e, finalmente, alinhar algumas sugestões para a continuação do trabalho.

7.1 SÍNTESE DO TRABALHO

Definiu-se como objetivo central do trabalho avaliar a instalação propulsora de um navio militar tipo corveta para, em seguida, propor alternativas de solução aos problemas apontados e selecionar a melhor opção para efetuar uma reforma nesta instalação.

A partir da definição deste objetivo, foi feito inicialmente um resumo dos principais conceitos teóricos que seriam utilizados no desenvolvimento do trabalho. São abordados temas como o projeto de uma instalação propulsora, resistência ao avanço, os efeitos de deterioração do casco sobre o desempenho do navio entre outros.

Foi apresentada a seguir, uma revisão das principais características dos navios militares, dos diferentes tipos de instalação propulsora que são empregadas, bem

como efetou-se um levantamento de dados de navios semelhantes à corveta em estudo, para se identificar o tipo de instalação propulsora mais utilizado.

Depois, o trabalho focalizou os requisitos de missão do navio, assim como suas principais dimensões e características. Em seguida, foi feita uma descrição da instalação propulsora da corveta "Delfim", tanto no projeto original como na modificação após a prova de mar com a inclusão da câmara hyperbar.

No capítulo 5, foi feita uma avaliação exaustiva da instalação propulsora da corveta, analisando primeiro seu projeto, através do tipo de instalação propulsora utilizado, do cálculo da potência instalada, da seleção do conjunto propulsor e da influência da descarga submarina, para, em seguida, analisar seu desempenho, através do exame das condições de acoplamento, das consequências do uso da câmara hyperbar, do incremento da rugosidade no casco do navio e do seu comportamento em diferentes condições de operação.

Finalmente, no capítulo 6, é discutido o projeto da nova instalação propulsora, em relação à velocidade que o navio deve atingir, para, em seguida, apresentar as diversas alternativas de solução e definir os critérios de avaliação. É aplicada então, a técnica da "Matriz de Decisão", para comparar as opções e escolher a melhor configuração.

7.2 CONCLUSÕES

O levantamento das informações dos navios semelhantes permitiu concluir que a escolha do motor diesel como máquina principal de propulsão e o arranjo de 4 eixos, sendo cada um acionado por um motor, é o tipo de instalação propulsora mais utilizado em navios como a corveta "Delfim", e, portanto, neste aspecto a escolha da concepção da instalação foi correta.

No entanto, o projeto da instalação propulsora apresentou uma série de falhas. A potência instalada do sistema propulsor é um pouco menor que a potência

instalada requerida para atingir a máxima velocidade do navio (37 nós), o que significa que a instalação propulsora foi projetada sem considerar nenhuma folga de potência para condições mais severas de operação. Além disso, por não se efetuar um julgamento correto das características dos componentes, a instalação propulsora resultante não permite tirar proveito de toda a potência instalada, ademais de ter gerado outros problemas para o navio.

- Em condições médias de casco e mar não se utiliza a potência máxima do motor e não se atinge a máxima velocidade. Isto é decorrente de uma escolha inadequada do conjunto motor-hélice; (relação passo/diâmetro do hélice alta)
- Não é possível acoplar o motor ao eixo propulsor sem a utilização da câmara hyperbar, pois o motor em baixas rotações não fornece a potência requerida pelo hélice.

A escolha de um motor protótipo com sistema de duplo carregamento não foi uma decisão correta. Especialmente em instalações navais, onde se exige o máximo de confiabilidade, deveria ter sido selecionado um motor já testado em outro navio.

A solução apresentada pelos projetistas, de instalar a câmara hyperbar, para suprir a energia necessária para que os turbocompressores possam se auto-sustentar e alimentar ao motor corretamente, foi errada, porque o consumo de combustível aumentou bastante, reduzindo o raio de ação do navio. Além disso, devido às altas temperaturas de trabalho deste sistema, vários componentes do sistema de gases de escape do motor e dos turbocompressores se deterioraram com rapidez, reduzindo seu intervalo de manutenção.

A escolha de hélice de passo fixo como elemento propulsor, não foi apropriada, pois usualmente este tipo de hélice é utilizado em navios que navegam a velocidade constante ou com pouca variação deste parâmetro. Deveria ter sido escolhido para este navio hélice de passo controlável pela flexibilidade que este propulsor proporciona à instalação propulsora. Para o caso da corveta "Delfim" pode-se conseguir, por meio da redução do passo, um menor torque do propulsor

possibilitando o acoplamento do motor sem a necessidade da inclusão da câmara hyperbar. Adicionalmente, o uso do hélice de passo controlável permite ajustar a curva de potência requerida do propulsor quando ocorre acréscimo de resistência do casco, de forma a utilizar a máxima potência fornecida pelo motor.

A descarga de gases submarinos não impede a operação do motor diesel, porém, prejudica seu desempenho. Portanto, com a finalidade de melhorar o desempenho do motor, é recomendável fazer uma modificação ao sistema de gases de descarga. Assim, principalmente durante o acoplamento, os gases poderiam ser descarregados ao meio ambiente através de um escape aéreo, que teria instalado um anel de restrição com água de mar para baixar a temperatura destes gases, conseguindo, desta forma, aliviar o trabalho do motor preservando a finalidade estratégica do escape submarino.

A análise do desempenho da instalação propulsora para diferentes condições de operação mostrou que, com o passar do tempo de serviço do navio, o aumento da rugosidade afetou o desempenho da instalação propulsora incrementando a curva de potência requerida para atingir uma determinada velocidade ou até deixando esta curva fora da região de operação do motor. Por isso, é importante manter um programa bem planejado de docagens para manutenção do casco e do hélice, para assim evitar um aumento muito grande da rugosidade.

A descrição do desempenho atual da instalação propulsora mostra que, devido às deficiências que apresenta, é necessário reformá-la, para que o navio possa, assim, recuperar sua capacidade operativa e cumprir os requisitos de missão.

Com base no resultado apresentado na matriz de decisão, conclui-se que, a melhor alternativa para reformar a atual instalação propulsora da corveta “Delim”, é aquela que utiliza uma configuração que conserva o motor atual mas muda o hélice de passo fixo por um hélice de passo controlável, pois este propulsor oferece melhores condições de operação, satisfazendo desta forma os requisitos de missão do

navio. Para este caso, é necessário que os motores S.A.C.M. 240 V16-EBS, sejam submetidos a um processo de manutenção integral.

7.3 RECOMENDAÇÕES

O estudo sobre a reforma da instalação propulsora da corveta "Delim" apresentado neste trabalho foi desenvolvido utilizando algumas premissas. Para a escolha da melhor configuração do sistema propulsor foram adotados certos critérios de comparação. Além disso, existem, certamente, algumas limitações no trabalho realizado. Para tornar mais abrangente o estudo são apresentadas a seguir algumas recomendações.

Foi assumido que o motor MTU, utilizado como alternativa de solução, fornece em mínimas rotações um torque superior ao torque requerido pelo hélice de passo fixo original do navio, mas é preciso verificar com o fabricante se isto é correto.

Por razões de tempo, para definir o campo das alternativas de solução, foram fixadas algumas características do hélice. Seria conveniente procurar avaliar outras soluções que incluam modificações nestes parâmetros.

Em relação ao procedimento de seleção empregado, seria interessante usar uma outra forma para a matriz de decisão onde os fatores econômicos sejam agrupados num único fator, para comparar os resultados com o modelo de matriz utilizado. De qualquer modo, entende-se que a matriz de decisão deve ser realimentada com informação de especialistas e usuários do navio. Assim, pode-se ter uma avaliação mais ponderada pois, tanto os critérios de comparação quanto os pesos e notas atribuídas, foram decididos por uma única pessoa, o que dá um caráter subjetivo aos resultados finais.

A configuração da instalação propulsora selecionada como melhor alternativa de solução deve ser analisada mais profundamente para definir com exatidão as especificações técnicas para implementação da reforma.

ANEXOS

ANEXO A

Dados fornecidos ao programa "Autopower" para o cálculo da resistência ao avanço com máxima carga (calado 2,70 m)

Resistance and power prediction from Autopower V3.0.1

Project:	Delfim
Date:	15 Aug 02
Hull Type:	Displacement
Hull Data	
LWL	59.15m
Breadth	8.48m
Draught (F)	2.70m
Draught (A)	2.70m
Displacement	686.0t
LCB	5.41%
Cwp	0.810
Cm	0.730
(1+K)	1.220
Wetted Hull Area	528.9m ²
Wetted Appendages Area	0.0m ²
Wetted Transom Area	8.6m ²
Transom Width	7.8m
Half Angle of Entrance	1.0deg
Half Angle of Run	0.0deg
Angle at 1/4 Buttock	0.0deg
Bulbous Bow	NO
Body Type - Fwd:	V-Shaped
Body Type - Aft:	Normal
Service Margin	0.00%
Appendage Allowance	0.00%
Appendage Form Factor	0.0
Cb	0.494
Cp	0.676
Service Speed	25.0knots

ANEXO B

- 1.- Séries polinomiais da série B-Troost
- a.- Séries polinomiais dos hélices B-Troost para o cálculo do coeficiente de empuxo (K_T)

Coeficientes para K_T		J	P/D	Ae/Ao	Z
0.00880496	0	0	0	0	0
-0.20454	1	0	0	0	0
0.166351	0	0	1	0	0
0.158114	0	0	2	0	0
-0.147581	2	0	0	1	0
-0.481497	1	1	1	1	0
0.415437	0	0	2	2	0
0.0144043	0	0	0	0	1
-0.0530054	2	0	0	0	1
0.0143481	0	0	1	0	1
0.0606826	1	1	1	0	1
-0.0125894	0	0	0	1	1
0.0109689	1	0	0	1	1
-0.133698	0	0	3	0	0
0.00638407	0	0	6	0	0
-0.00132718	2	6	0	0	0
0.16849600	3	0	0	1	0
-0.0507214	0	0	0	2	0
0.0854559	2	0	0	2	0
-0.0504475	3	0	0	2	0
0.010465	1	6	6	2	0
-0.00648272	2	2	6	2	0
-0.00841728	0	0	3	0	1
0.0168424	1	1	3	0	1
-0.00102296	3	3	0	0	1
-0.0317791	0	0	3	1	1
0.018604	1	1	0	2	1
-0.00410798	0	0	2	2	1
-0.000606848	0	0	0	0	2
-0.0049819	1	1	0	0	2
0.0025983	2	2	0	0	2
-0.000560528	3	3	0	0	2
-0.00163652	1	1	2	0	2
-0.000328787	1	1	6	0	2
0.000116502	2	2	6	0	2
0.000690904	0	0	0	1	2
0.00421749	0	0	3	1	2
0.0000565229	3	6	6	1	2
-0.00146564	0	0	3	2	2

b.- Séries polinomialis dos hélices B-Troost para o cálculo do coeficiente de torque (K_Q)

Coeficientes para K_Q		J	P/D	Ae/Ao	Z
0.00379368	0	0	0	0	0
0.00886523	2	0	0	0	0
-0.032241	1	1	1	0	0
0.00344778	0	0	2	0	0
-0.0408811	0	0	1	1	0
-0.108009	1	1	1	1	0
-0.0885381	2	2	1	1	0
0.188561	0	0	2	1	0
-0.00370871	1	1	0	0	1
0.00513696	0	0	1	0	1
0.0209449	1	1	1	0	1
0.00474319	2	2	1	0	1
-0.00723408	2	2	1	1	1
0.00438388	1	1	1	1	1
-0.0269403	0	0	2	1	1
0.0558082	3	3	0	1	0
0.0161886	0	0	3	1	0
0.00318086	1	1	3	1	0
0.015896	0	0	0	2	0
0.0471729	1	1	0	2	0
0.0196283	3	3	0	2	0
-0.0502782	0	0	1	2	0
-0.030055	3	3	1	2	0
0.0417122	2	2	2	2	0
-0.0397722	0	0	3	2	0
-0.00350024	0	0	6	2	0
-0.0106854	3	3	0	0	1
0.00110903	3	3	6	0	1
-0.000313912	0	0	0	1	1
0.0035985	3	3	0	1	1
-0.00142121	0	0	6	1	1
-0.00383637	1	1	0	2	1
0.0126803	0	0	2	2	1
-0.00318278	2	2	3	2	1
0.00334268	0	0	6	2	1
-0.00183491	1	1	1	0	2
0.000112451	3	3	2	0	2
-0.0000297228	3	3	6	0	2
0.000269551	1	1	0	1	2
0.00083265	2	2	0	1	2
0.00155334	0	0	2	1	2
0.000302683	0	0	6	1	2
-0.0001843	0	0	0	2	2
-0.000425399	0	0	3	2	2
0.0000869243	3	3	3	2	2
-0.0004659	0	0	6	2	2
0.0000554194	1	1	6	2	2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTOSHIP SYSTEM CORPORATION. Autopower for Windows. Release 2.0. Vancouver : 1994.

BURRILL, L.C.; EMERSON, J.; Propeller cavitation : Further tests on 16 in. propeller models in the King's College cavitation tunnel. Transactions of North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders (NIECES). v.79. 1962.

BRANCH, A.; Elements of shipping. Seventh edition. London : Chapman and Hall, 1996.

BRINATI, H.T.; Instalações Propulsoras v.I e v.II. São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1979.

CABRAL, M.; As novas fronteiras do mar. III Conferência da Organização das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. Genebra : Agosto, 1980.

CALGARE, A.; Considerações sobre um modelo de síntese proposto para o projeto de concepção de navios de guerra do tipo patrulha, com deslocamento entre 800 e 1800 toneladas. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.

CAMILLO, R.; Seleção de sistema propulsor para navios oceanográficos. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

CARLTON, J.S.; Marine propellers and propulsion. London : Butterworth-Heinemann Ltda, 1997.

CENTRO TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO; Navios de superfície nucleares. Disponível em : <<http://www.ctmosp.mar.mil.br/navios.htm>>. Acesso em : 10 setembro 2002.

- DE BAKKER, G;** The Modern Corvette, fire power on a small platform. London : International Defence Review, Nº 3, 1990.
- DI GRAZIA, M;** Inversores contribuindo para redução do consumo de energia. Boletim informativo da Yasakawa elétrico do Brasil. Disponível em : <<http://www.yasakawa.com.br/news/drivenews.13pdf>>. Acesso em : 11 dezembro 2002.
- FONSECA, M;** Arte Naval. Rio de Janeiro : Serviço de Documentação Geral da Marinha, 1989.
- FORBES, J; JUDD, G;** Design, fabrication and testing of composite superstructures for warships. In : International Conference on Advances in Marine Structures III. Dunfermline : May, 1997.
- ESCOLA SUPERIOR DE GUERRA;** Fundamentos Doutrinarios da Escola Superior de Guerra. Rio de Janeiro, 1998.
- GALANTE, A;** As corvetas classe Inhaúma. Disponível em : <<http://www.virtualland.net/naval/dossie/corvetas>>. Acesso em : 10 agosto 2002.
- GERR, D;** Propeller Handbook. Maine : International Marine Publishing Company, 1999.
- HARRINGTON, R.** (Ed.) Marine Engineering. New Jersey : The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1992.
- HARVALD, S.V.AA;** Resistance and propulsion of ships. Lyngby : Department of Ocean Engineering. The Technical University of Denmark, 1983.
- HIRATA, K;** Hidrodinâmica I. Faculdade de Tecnologia de Jabú, 1991.

- HOLTROP, J; MENNEN, G;** A statistical power prediction method. International Shipbuilding Progress, v.25, October, 1978.
- HOLTROP, J; MENNEN, G;** An approximate power prediction method. International Shipbuilding Progress, v.29, July, 1982.
- HOLTROP, J; MENNEN, G;** A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. International Shipbuilding Progress, v.31, June, 1984.
- IRELAND, B;** Navios de Guerra- da vela à era nuclear. London : The Hamlyn Publishing Group Limited, 1987.
- KAN, S. et al.** Effect of fouling of a ship's hull and propeller upon propulsive performance. International Shipbuilding Progress, v. 5, January, 1958.
- KASTEN, M;** Some notes on controllable pitch propellers. Disponível em : <<http://www.kastemmarine.com/CProps.htm>> . Acesso em : 07 outubro 2002.
- KRESIC, M; HASKEL, B;** Effects of propeller design-point definition on the performance of a propeller/diesel engine system with regard to in-service roughness and weather conditions. Transaction of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v. 91, 1983.
- LEWIS, E.V. (Ed)** Principles of Naval Architecture. Resistance, propulsion and vibration. Second revision, v.II. New Jersey : The Society of Naval Architects and Marine Engineers-SNAME, May, 1988.
- MALONE, J.A; LITTLE, D.E; ALTMAN, M;** Effects of hull foulants and cleaning/coating practices on ship performance and economics. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v. 88, 1980.

- MANNING, C.G.; Fundamentos de teoria de arquitetura naval. v II. 15 edigão. Rio de Janeiro : Ministério da Marinha, 1962. 224 p.
- MARINE ENGINEERING REVIEW; New York : The Institute of Marine Engineers, november, 1999.
- MARTIN, L.; Ships propulsion layout. Disponível em : <http://www.martin's-marine.engineering.page/propulsion_layout.htm>. Acesso em : 15 outubro 2002.
- MULLIGAN, R; COURTS, M; Corvette design considerations. In : International Symposium on Surface Warships : The Next Generation. London : Royal Institution of Naval Architects, 1998.
- PENGELLEY, P; Turning the naval propulsion helm. New York : Jane's Navy International, January-February, 1999.
- PRESTON, A; Warships of the world. London : Jane's Publishing Company Limited, 1990.
- RIVA, C; Considerações sobre o projeto de navios não convencionais. São Paulo : Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1980.
- RIZZOLI, C; Plantas motrices convencionales para buques de superficie. Disponível em : <<http://www.fuerzasnavales.com/propulsores/propulsores.html>>. Acesso em : 04 novembro 2002.
- SAMPAIO, C; RUSSO, A; LLEYDA, A; Avaliação da resistência ao avanço de um navio-patrulha classe "Grajau". In : XIX Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA). Rio de Janeiro : Outubro, 2002.

- SHARPE, R. (Ed.)**. Jane's Fighting Ships 1997-1998. 27th Edition. London : JANE'S INFORMATION GROUP LIMITED, 1997.
- SIMPÓSIO SOBRE O PROJETO DE CORVETAS DE 1900TON. DA MARINHA DO BRASIL**. Rio de Janeiro : 1983.
- SKOLNIK, D;** Small ships, advanced technology and warfighting performance. Naval Engineers Journal. Virginia : The American Society of Naval Engineers, May, 1991. p.30-45.
- SLADE, S;** Shafting a ship. Disponível em : <<http://www.warships1.com/W-Tech/tech-036.htm>>. Acesso em : 01 novembro 2002.
- SOCIEDADE ALSACIANA DE CONSTRUÇÕES MECÂNICAS;** Manual descritivo do motor S.A.C.M. 240 V16-EDS. Nantes : 1976.
- TODD, F.H;** Resistance and propulsion. In : COMSTOCK, J.P. (Ed.). Principles of Naval Architecture. New York : The Society of Naval Architects and Marine Engineers-SNAME, 1967. p. 288-462.
- TORNBALD, J;** Marine propellers and propulsion of ships. Sweden : Marine Laboratory KAMEWA, 1997.
- TOWSIN, R.L. et al.** Speed, power and roughness: the economics of outer bottom maintenance. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Spring Meeting, paper Nº 11, 1980.
- TOWSIN, R.L. et al.** Estimating the technical and economical penalties of hull and propeller roughness. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers. v. 89. 1981.

UNITED SHIP DESIGN AND DEVELOPMENT CENTER. Propeller open water tests database B-series. Disponível em : <<http://its.usddc.org/tw/bseries.htm>>. Acesso em : 09 julho 2002.

APÉNDICE

APÊNDICE I

Cálculo da resistência de atrito

Dados utilizados :

Velocidade do navio (V)	36 nós = 60,75 pés/s
Comprimento da linha d' água (L)	59,15 m = 194,10 pés
Superfície molhada (S)	528,90 m ² = 5690,11 pés ²
Densidade (ρ)	1,9905 (lbs . s ²)/pes ⁴

Para o cálculo da resistência de atrito será aplicado o método de Schoenherr, que utiliza a seguinte formulação :

$$R_e = \frac{VL}{v} \quad (1.1)$$

onde R_e é o número de Reynolds e v é a viscosidade cinemática.

Para água salgada e temperatura de 59°F, o valor da viscosidade cinemática corresponde a $1,2817 \times 10^{-5}$ pes²/s. Com este valor e, utilizando a fórmula 1.1, pode-se calcular o número de Reynolds, cujo valor é de $9,1956 \times 10^8$.

Com o número de Reynolds, o coeficiente de atrito (Cf) pode ser obtido da tabela 101 do trabalho de Manning (1962), que corresponde a um valor de 0,001547, e a resistência de atrito (Rf) calculada pela equação 1.2 :

$$R_f = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (1.2)$$

Desta forma obtém-se a resistência de atrito que corresponde a um valor de

Com base nos resultados obtidos através do programa Autopower, para 36 nós de velocidade, corresponde uma resistência total de 529,14 KN, que equivale a 118,8659 x 10³ lbs.

Portanto, a relação R_f/R_T para este caso representa :

$$\frac{R_f}{R_T} = \frac{32332,23}{118865,9} = 0,272 = 27,2\%$$