

MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMA DE PROPULSÃO HIDROJATO: Possibilidades Futuras nos meios navais da MB.

1T AGENOR FABIANO PAMPOLHA GARCIA

Rio de Janeiro  
2018

1T AGENOR FABIANO PAMPOLHA GARCIA

SISTEMA DE PROPULSÃO HIDROJATO: Possibilidades Futuras nos meios navais da MB.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:

CA (EN Ref.) Tiudorico Leite Barboza

Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto

Prof. Cesar Augusto Lampe Linhares da Fonseca

CIAW  
Rio de Janeiro  
2018

## FOLHA DE APROVAÇÃO

1T AGENOR FABIANO PAMPOLHA GARCIA

SISTEMA DE PROPULSÃO HIDROJATO: Possibilidades Futuras nos meios navais da MB.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

Tiudorico Leite Barboza, CA (EN Ref.) – CIAW \_\_\_\_\_

Luiz Antonio Vaz Pinto, D.Sc. – COPPE/UFRJ \_\_\_\_\_

Cesar Augusto Lampe Linhares da Fonseca, PhD – CIAW \_\_\_\_\_

Garcia, Agenor Fabiano Pampolha

**SISTEMA DE PROPULSÃO HIDROJATO: Possibilidades Futuras nos meios navais da MB.**

/ Agenor Fabiano Pampolha Garcia. – Rio de Janeiro, 2018.

62 p.: il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval (CApA-PN) – Centro de Instrução “Almirante Wandenkolk”, 2018.

Orientadores: CA (EN Ref.) Tiudorico Leite Barboza.

Professor, D.Sc Luiz Antonio Vaz Pinto.

Professor, Ph.D Cesar Augusto Lampe Linhares da Fonseca.

Referências: p. 57-59

1. Hidrojato. 2. Análise comparativa. 3. Emprego do hidrojato em navios militares. 4. Estudo de caso. 5. Vantagens e desvantagens do hidrojato.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por estar sempre presente nesta caminhada.

Aos meus pais, Agenor e Katia, que me ensinaram os valores que hoje compõem meu caráter. Sem vocês, jamais teria vencido este desafio.

Aos meus avós, Fabiano, Celia e Maria das Graças, por todo amor, suporte e conselhos.

A minha companheira Crislaine, que dividiu comigo as alegrias e angústias deste desafio e sempre foi uma das minhas maiores incentivadoras durante este processo.

Ao meu orientador, Exmo. Sr. Contra-Almirante (EN Ref.) Tiudorico Leite Barboza, pelas sólidas orientações técnicas, sugestões e colaboração para o término deste Trabalho Conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Ao meu orientador, professor Luiz Vaz, por todo suporte e conhecimento passado durante o desenvolvimento desta monografia.

Ao meu orientador, professor Cesar, pela disponibilidade e auxílio para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, por estarem sempre ao meu lado, vibrando com as minhas vitórias e me amparando nas derrotas.

Ao CIAW – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Organização Militar da MARINHA DO BRASIL, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À COPPE/UFRJ por ser um órgão de pesquisa competente, sempre trabalhando em prol de seus alunos, tendo em seu rol de professores e funcionários pessoas extremamente sérias e envolvidas com a pesquisa no Brasil.

SISTEMA DE PROPULSÃO HIDROJATO: Possibilidades Futuras nos meios navais da MB.

## **Resumo**

Este trabalho tem por objetivo analisar o emprego da propulsão por hidrojato nas embarcações orgânicas da Marinha do Brasil, estabelecendo uma análise comparativa com o sistema de propulsão por motor de popa, mais comum em embarcações miúdas, analisando as vantagens e desvantagens dos sistemas em lide. Para isso, são apresentados diversos conceitos e informações importantes sobre o sistema de jato d'água, principalmente suas características energéticas e panorama geral de uso. Além disso, é realizado um estudo de caso da aplicação de hidrojato nas lanchas Pacific 24, embarcações orgânicas dos Navios-Patrolha da classe "Amazonas", que fornece uma visão geral do uso do hidrojato para fins militares, possibilitando verificar a viabilidade de implementação desse tipo de propulsão em outros meios navais da Marinha do Brasil, levando em conta aspectos como dificuldades de manutenção e principais avarias do hidrojato.

**Palavras-chave:** análise, hidrojato, marinha do brasil, propulsão, vantagens.

WATERJET PROPULSION SYSTEM: Possibilities for future Brazilian Navy 's marine vessels.

**Abstract**

The objective of this work is to analyze the use of waterjet propulsion in the Brazilian Navy 's marine vessels, establishing a comparative analysis with outboard motors, more common in small vessels, analyzing the advantages and disadvantages of the waterjet propulsion systems. Therefore, several concepts and important information about the waterjet system are showed, mainly its energetic characteristics and general usage panorama. In addition, a case study of the waterjet application is carried out on the Pacific 24 boats, boats of the "Amazonas" class patrol vessels, which provides an overview of the use of the waterjet for military purposes, making it possible to verify the feasibility of implementing this waterjet propulsion system in other Brazilian Navy 's marine vessels, taking into account aspects such as maintenance difficulties and major waterjet faults.

**Keywords:** analysis, waterjet, Brazilian Navy, propulsion, advantages.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão tridimensional de uma instalação de hidrojato .....	19
Figura 2 – Sistema de hidrojato idealizado .....	20
Figura 3 – Princípio da capacidade de manobra do hidrojato .....	23
Figura 4 – Mecanismo do controle de empuxo do hidrojato .....	24
Figura 5 – Regimes de operação do propulsor: (a) – não cavitante; (b) - subcavitante; (c) – supercavitante .....	25
Figura 6 – Motor de popa convencional, com propulsor supercavitante .....	26
Figura 7 – Estados do Brasil que possuem assistência técnica em hidrojatos .....	31
Figura 8 – Vida útil dos componentes do sistema de hidrojato .....	32
Figura 9 – (HSV-X1) .....	33
Figura 10 – USS Freedom (LCS 1) .....	34
Figura 11 – USS Independence (LCS 2) .....	34
Figura 12 – Navios da Classe “Visby” .....	35
Figura 13 – Fragata da Classe “Valour” .....	35
Figura 14 – Navio da Classe “Skjold” .....	36
Figura 15 – Navio da Classe “Hamina” .....	36
Figura 16 – Navios da Classe “Car Nicobar” .....	37
Figura 17 – Navio da Classe “Gumdoksuri” .....	37
Figura 18 – Submarino “Seawolf” .....	39
Figura 19 – Veículos Anfíbio de Assalto NAMJet 431AAV .....	40
Figura 20 – Protector USV .....	41
Figura 21 – Protótipo de Fragata com AWJ-21 <sup>TM</sup> .....	42
Figura 22 – Advanced WaterJet (AWJ-21 <sup>TM</sup> ) .....	42
Figura 23 – Militares do NPaOc Amazonas realizando ações de inspeção nas AJB .....	44
Figura 24 – Lancha PACIFIC 24 no berço .....	44
Figura 25 – DGS RAPTOR 888, embarcação recentemente adquirida pela MB .....	46
Figura 26 – CODAG WARP .....	47
Figura 27 – Características principais da turbina LM2500+G4 (General Electric) .....	49
Figura 28 – Arranjo do hidrojato e turbina .....	49
Figura 29 – Vista do Motor da lancha Pacific 24 aberto, após a avaria .....	51



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos Navios com hidrojato .....	38
Tabela 2 – Parâmetros de operação do propulsor operando nas três velocidades analisadas .....	52
Tabela 3 – Resultados dos cálculos de eficiência quase-propulsiva. ....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Eficiência de propulsores em relação à velocidade do navio .....	28
Gráfico 2 – Volume de Delocamento $V^{1/3}$ x Comprimento L .....	38
Gráfico 3 – Eficiência de hidrojetos e propulsores convencionais .....	46
Gráfico 4 – Velocidade x Índice de cavitação .....	48
Gráfico 5 – Comparativo das cavitações entre os casos com e sem hidrojetos .....	48
Gráfico 6 – RPM do impelidor do hidrojato .....	50

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAV	Assault Amphibious Vehicle
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESD	Advanced Electric Ship Demonstrador
AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
CIAW	Centro de Instrução Almirante Wandenkolk
CODAG	Combined Diesel and Gas
CODOG	Combined Diesel or Gas
FEP	Full Electric Propulsion
HSV	High Speed Vessel
LCS	Littoral Combatant Ship
MB	Marinha do Brasil
NPaOc	Navios-Patrolha Oceânico
RSN	Republic of Singapore Navy
SSN	Submersible Ship Nuclear
USS	United States Ship
USV	Unmanned Surface Vehicle
WARP	Water Jet and Refined Propeller

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$A_j$	área do jato d'água na “vena contracta”
$A_n$	área no plano de saída do bocal
$C_p$	coeficiente de pressão
$D$	diâmetro do propulsor
$g$	gravidade com valor de $9,807 \text{ m/s}^2$
$h_j$	altura do jato d'água na “vena contracta”
$h_{perda}$	perdas de carga do fluxo através do sistema e as perdas de carga na bomba
$H$	energia potencial fornecida ao sistema pela bomba do hidrojato
$K_Q$	coeficiente de torque
$\dot{m}$	vazão mássica
$N$	rotação, rpm
$p$	pressão
$P_{bomba}$	energia por unidade de tempo transferida para a água pela bomba
$P_T$	potência propulsiva
$Q$	taxa de fluxo
$t$	coeficiente de redução da força propulsiva
$T$	empuxo
$V$	velocidade
$V_a$	velocidade de avanço do propulsor
$V_j$	velocidade do jato d'água na “vena contracta”
$V_S$	velocidade do navio
$w$	coeficiente de esteira

$\zeta$	coeficiente de perdas no duto
$\eta_0$	eficiência em águas abertas do propulsor
$\eta_D$	eficiência quase-propulsiva
$\eta_H$	eficiência do casco
$\eta_{jet}$	eficiência do propulsor jato d'água
$\eta_{rr}$	eficiência relativa rotativa
$\eta_P$	eficiência hidráulica da bomba, $\eta_{pump}$ ; $\eta_{bomba}$
$\mu$	taxa de velocidade do jato d'água
$\pi$	constante matemática com valor aproximado de 3,1415
$\rho$	densidade da água com valor de 997,0479 kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	coeficiente de fluxo, $Q/ND^3$
$\psi$	coeficiente de transferência de energia, $gH/N^2D^2$
$\Delta h$	perda de carga entre a entrada e saída do jato de água

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Apresentação do Problema .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Justificativa e Relevância .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>16</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	16
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>1.4 Metodologia do Trabalho .....</b>	<b>17</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Hidrojato .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Histórico da propulsão por hidrojato .....	18
2.1.2 Descrição do sistema de propulsão por hidrojato .....	19
2.1.3 Princípios físicos e termodinâmicos do hidrojato .....	20
2.1.4 Aspectos de manobra do hidrojato .....	23
<b>2.2 Propulsão convencional .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Propulsor supercavitante .....</b>	<b>25</b>
<b>3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HIDROJATO E MOTOR DE POPA CONVENCIONAL .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Vantagens da propulsão por hidrojato .....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Segurança .....	27
3.1.2 Manobrabilidade .....	27
3.1.3 Eficiência .....	28
3.1.4 Ruído e cavitação .....	29
3.1.5 Aterramento .....	29
<b>3.2 Limitações do Hidrojato .....</b>	<b>30</b>
3.2.1 Eficiência em baixas velocidades .....	30
3.2.2 Custo de manutenção e dependência da tecnologia estrangeira .....	30
3.2.3 Assistência técnica do hidrojato no Brasil .....	30
<b>3.3 Marinhas que empregam sistemas de propulsão por hidrojato .....</b>	<b>32</b>
3.3.1 Emprego em navios.....	33

3.3.2 Emprego em submarinos .....	39
3.3.3 Emprego em Veículos de Assalto Anfíbio .....	39
3.3.4 Emprego em Embarcações de Superfície Não-Tripuladas .....	40
<b>3.4 Protótipo da Marinha Americana .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 Emprego do hidrojato na Marinha do Brasil .....</b>	<b>43</b>
3.5.1 Lancha Pacific 24 .....	43
3.5.2 DGS 888 RAPTOR .....	45
<b>3.6 Projeto de Corveta Brasileira Moderna .....</b>	<b>46</b>
<b>3.7 Estudo de caso das lanchas Pacific 24 .....</b>	<b>50</b>
<b>4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HIDROJATO E PROPULSÃO CONVENCIONAL .....</b>	<b>52</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Considerações Finais .....</b>	<b>56</b>
<b>5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A - Método Holtrop para o Navio-Patrolha Grajaú .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 1 - Cartão de manutenção do hidrojato da lancha Pacific 24 .....</b>	<b>62</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os navios militares, via de regra, devem apresentar grande flexibilidade operativa, robustez e confiabilidade no cumprimento de suas missões. Porém, devido ao tipo de propulsão utilizado, muitas vezes os meios navais enfrentam limitações quanto à manobrabilidade em locais de pouca profundidade e que exijam velocidades altas, como na região amazônica ou pantanal.

Neste contexto, alguns tipos de propulsão mais avançados, como o hidrojato, ganham enorme relevância, pois oferecem vantagens quanto à versatilidade e velocidade despendida em regiões de difícil manobrabilidade.

Além dos aspectos operacionais, a eficiência no consumo de combustíveis apresenta grande importância, tendo em vista a situação precária em que se encontra a economia brasileira e, conseqüentemente, a Marinha do Brasil, que vem enfrentando diversos cortes no orçamento nos últimos anos.

Levando-se em consideração que a propulsão convencional comprovadamente não oferece boa eficiência em altas velocidades (ALLISON, 1978), faz-se necessária a realização de estudos de viabilidade para a implementação de tipos de propulsão alternativos, que ofereçam um melhor desempenho em relação ao consumo de combustível nessa condição de operação.

### **1.1 Apresentação do Problema**

Tendo em vista que muitas embarcações militares, notadamente as miúdas, enfrentam limitações quanto ao emprego em regiões de difícil acesso devido ao uso de propulsão convencional, seria viável a implementação de propulsão por hidrojato nesses meios navais?

### **1.2 Justificativa e Relevância**

A Marinha do Brasil tem como missão principal a garantia da soberania nacional nas águas jurisdicionais brasileiras. Para isso, é necessário que os meios empregados sejam modernos, versáteis, robustos e eficientes. O que se observa, entretanto, é uma dificuldade do



cumprimento dessa missão, principalmente em regiões ribeirinhas e pantanal, onde pequenas profundidades e presença de troncos e entulhos na água oferecem riscos à integridade dos motores de popa tradicionais, o que limita a fiscalização nessas regiões.

Tais limitações na fiscalização pela MB, naturalmente tendem a aumentar ações ilícitas nessas áreas, principalmente no que tange a contrabando, pesca ilícita e tráfico de drogas.

Sendo assim, a implementação de sistemas de propulsão que venham a dirimir tais limitações seria uma forma muito útil de melhorar as condições de operação das embarcações de fiscalização nessas regiões sensíveis, o que aumentaria sobremaneira a capacidade de cumprir suas missões.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar a viabilidade de instalação da propulsão por hidrojato nas embarcações miúdas, de médio e de grande porte da MB, avaliando vantagens e desvantagens desse sistema em relação à propulsão convencional, bem como possíveis dificuldades enfrentadas para essa implementação.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- 1) Comparar os modos de funcionamento do hidrojato e motores de popa convencionais;
- 2) Analisar vantagens e desvantagens entre hidrojato e motores de popa convencionais;
- 3) Analisar o emprego de hidrojato em meios navais de Marinha estrangeiras;
- 4) Analisar o emprego de hidrojato em embarcações miúdas já existentes na Marinha do Brasil;
- 5) Elencar e estudar dificuldades de implementação do hidrojato na Marinha do Brasil;

- 6) Avaliar a viabilidade de implantação da propulsão por hidrojetos em navios da MB.

## **1.4 Metodologia do Trabalho**

Na primeira parte do trabalho será feita a descrição dos tipos de propulsão em estudo: Motores de popa convencionais e propulsão por hidrojetos, abordando as principais características de cada tipo.

Na segunda parte, será feita uma análise comparativa entre os dois tipos de propulsão, ressaltando os aspectos concernentes à eficiência em diferentes condições de operação e vantagens de um em relação ao outro.

Na sequência, serão estudadas as dificuldades relacionadas ao emprego da propulsão por hidrojetos na Marinha do Brasil, principalmente fatores atinentes a implantação e custo de manutenção.

Em seguida, será estudado o emprego da propulsão por hidrojetos em meios navais de Marinhas estrangeiras e também em embarcações miúdas da Marinha do Brasil. Além disso, será realizado um estudo de caso sobre a utilização das lanchas PACIFIC 24, primeiras embarcações com sistema de propulsão por hidrojetos da MB.

Por fim, será feita uma análise comparativa da eficiência quase-propulsiva de um propulsor convencional e um hidrojetos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão elencadas e citadas obras importantes para a elaboração deste trabalho. Além disso, serão descritos os sistemas de propulsão hidrojetado, propulsores convencionais e supercavitantes.

### **2.1 Hidrojato**

Nesta seção, serão abordados conceitos importantes sobre hidrojetado, que serão fundamentais para as abordagens posteriores deste trabalho.

#### **2.1.1 Histórico da propulsão por hidrojetado**

O conceito de propulsão por jato de água remonta a 1661 quando Toogood e Hayes propuseram pela primeira vez esta forma de propulsão. Seu uso nos anos intermediários tem sido confinado principalmente a pequenas embarcações de recreio de alta velocidade e situações onde uma alta manobrabilidade se faz necessária. (CARLTON, 2012).

Entretanto, nos últimos anos, observa-se que o jato d'água passou a ser utilizado em embarcações de médio e até grande porte, o que foi possível graças ao aumento considerável dos tamanhos das unidades propulsoras por hidrojetado.

Segundo CARLTON (2012, p. 355), a razão para o uso comparativamente menor do jato de água em comparação com o hélice convencional é que este era geralmente considerado mais simples, leve e mais eficiente. No entanto, a introdução de bombas mais eficientes, além da necessidade de embarcações de maior velocidade são as principais razões para rápido crescimento do hidrojetado.

Segundo DE PINHO (2014, p. 14), a propulsão por hidrojetado é uma tecnologia que proporciona maior velocidade, menor calado e maior manobrabilidade. Garante frenagens instantâneas, realização de curvas fechadas e deslocamento em 360°, partindo de uma posição estacionária.

### 2.1.2 Descrição do sistema de propulsão por hidrojato

Segundo BULTEN (2006, p. 6), uma instalação de hidrojato montado na popa pode ser dividida em quatro componentes: a entrada, a bomba, o bocal e o dispositivo de direção. A Figura 1 mostra um desenho de uma instalação típica de jato de água, com os principais componentes destacados:

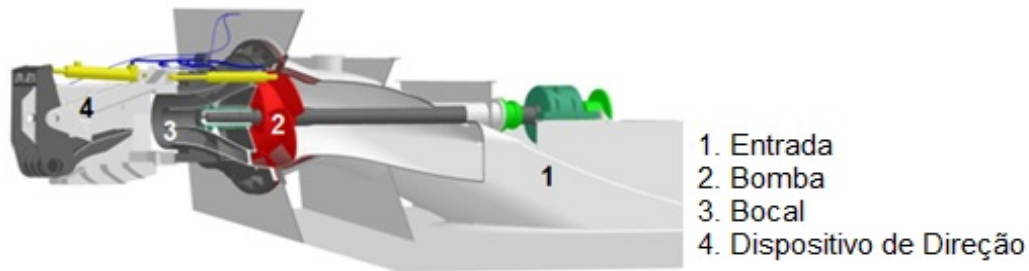


Figura 1 - Visão tridimensional de uma instalação de hidrojato. Fonte: BULTEN (2006).

O principal componente é a bomba, que produz o jato na saída do bico. Em geral, a bacia do estator e o bocal estão integrados em uma parte. A combinação da unidade de bomba e do bocal é considerada como a bomba de jato de água. O sistema de dutos ligados à bomba é chamado de entrada. O hidrojato ilustrado na figura 1 mostra um duto de entrada embutido, utilizado, por exemplo, em balsas rápidas e iates a motor de alta velocidade.

KRUPPA et al. (1968) deram uma visão geral dos conceitos básicos dos sistemas de dutos de entrada de hidrojato. Além da entrada embutida, são mencionadas as entradas do tipo “ram” e “scoop”, que têm uma abertura que se situa mais ou menos perpendicular à direção do fluxo, enquanto a abertura de entrada montada na parede é paralela ao fluxo. Acima do bocal há um dispositivo de direção, que pode desviar o jato de água, a fim de criar forças de direção e de reversão. Existem também instalações para a deflexão do jato, constituindo a opção de reversão, útil para operar com máquinas à ré ou até mesmo para manobras de parada rápidas.

O princípio de funcionamento do hidrojato, é semelhante ao das turbinas de avião a jato. A água da parte de baixo da embarcação é aspirada, pressurizada e lançada para trás em alta velocidade. Isso força o barco a deslocar-se para frente, criando o movimento.

Seu funcionamento é baseado na terceira lei de Newton: "A toda força de ação, corresponde uma força de reação de mesma intensidade e sentido contrário".

O sistema de direção funciona direcionando o jato d'água para os lados. Da mesma forma, pode-se acionar o reversor para obter máquinas a ré.

Além disso, trata-se de um sistema de propulsão que eliminam engrenagens reversoras, longos eixos, hélices e lemes.

### 2.1.3 Princípios físicos e termodinâmicos do hidrojato

Como base para considerar os princípios da propulsão por jato de água, pode-se tomar como referência a figura 2, que mostra um sistema de hidrojato idealizado.

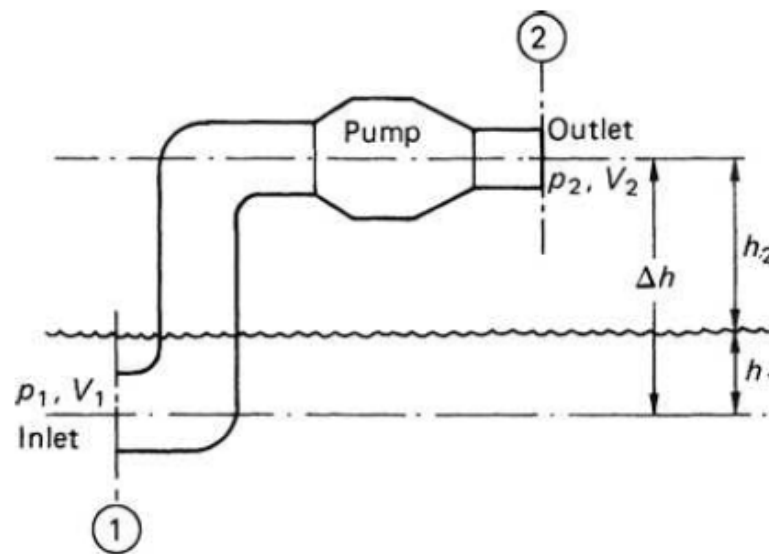


Figura 2 - Sistema de hidrojato idealizado. Fonte: CARLTON (2012).

Com base neste diagrama, supõe-se que a água entre no sistema com a velocidade  $V_1$  e sai com uma velocidade diferente  $V_2$  por meio de um bocal da área  $A_2$ . O fluxo de massa de água através do jato de água é então dado por:

$$\dot{m} = \rho A_2 V_2; \quad (Eq. 1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água.

Assim, o aumento na taxa de mudança de momento linear da água que passa através do jato de água, o empuxo produzido pelo sistema é dado por:

$$T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1); \quad (Eq. 2)$$

E a potência propulsiva  $P_T$  é dada por:

$$P_T = TV_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1); \quad (Eq. 3)$$

Onde  $V_S$  é a velocidade do navio.

Agora, a fim de derivar uma expressão útil para a potência necessária para acionar o sistema de jato de água é necessário recorrer à equação geral de energia do fluido mecânica e para aplicar isso entre a entrada e a saída da unidade. Por isso podemos escrever para o sistema:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h + h_{perda} \quad (Eq. 4)$$

Onde:

H é a parcela associada à energia potencial fornecida ao sistema pela bomba do hidrojato;

$\Delta h$  é perda de carga entre a entrada e saída do jato de água (ou seja,  $\Delta h = h_1 + h_2$ );

$h_{perda}$  é a parcela associada às perdas de carga do fluxo através do sistema e também as perdas de carga na bomba.

No caso da diferença  $\Delta h$  entre a entrada e saída do sistema do hidrojato deve ser observado que esta será uma variável entre as condições iniciais e condições de navegação. Já o termo de perda,  $h_{perda}$ , está associado às perdas por atrito que ocorrem durante a passagem do fluxo pelas curvas dos dutos e as várias obstruções através do sistema que podem impedir o fluxo durante a sua passagem pela unidade (CARLTON, 2012).

Voltando agora para a equação 4, para fins práticos, pode-se assumir que  $p_2$  é constante acima da água linha, tendo em vista que as alturas envolvidas e seu efeito sobre a pressão ambiente são pequenas. Com isso, a equação 4 pode ser reescrita como:

$$H = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_2 + h_{perda} \quad (Eq. 5)$$

Agora a energia transferida para a água pela bomba pode ser expressa em termos de energia por unidade de tempo como  $\dot{m}gH$ , que, da equação 5 leva à expressão:

$$P_{bomba} = \dot{m} \left[ \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{perda}) \right] \quad (Eq. 6)$$

Assim, é possível calcular a eficiência em águas abertas equivalente do hidrojato, que pode ser definida a partir das equações 3 e 6, sendo a razão entre a potência de empuxo e a potência entregue, da seguinte forma:

$$\eta_0 = \frac{V_s(V_2 - V_1)}{\left[ \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{perda}) \right]} \quad (Eq. 7)$$

Por analogia com os hélices, a eficiência da bomba do hidrojato pode ser expresso como:

$$\eta_{bomba} = \frac{\Phi\psi}{2\pi K_Q} \quad (Eq. 8)$$

Onde  $\phi$  e  $\psi$  são os coeficientes fluxo e de transferência de energia definidos por:

$$\Phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (Eq. 9) \quad \psi = \frac{gH}{N^2D^2} \quad (Eq. 10)$$

$K_Q$  é o coeficiente de torque normal do hélice convencional.

Enquanto o valor de  $\eta_{bomba}$  é claramente maior para um jato de água do que um hélice, esta não é a base sobre a qual a comparação deve ser feita (CARLTON, 2012). Uma comparação adequada só pode ser feita em termos do coeficiente quasi-propulsivo, que para o hélice, inclui o casco e eficiência relativa rotativa. Já para o jato de água, deve ser observado a equação 7 juntamente com um coeficiente de casco apropriado abrangendo o efeito do jato de água.

Segundo CARLTON (2012), em um sistema de propulsão por hidrojato, o casco e o jato de água interferem mutuamente entre si. A resistência de casco nu é modificada devido a uma distorção do fluido sobre a superfície do navio, que em altas velocidades também pode introduzir uma mudança no trim, influenciando as características de resistência ainda mais. Da mesma forma, o desempenho do jato de água é alterado pelas distorções do fluxo do casco, porque a camada limite da embarcação é perturbada no sistema de tomada de água e, portanto, difere das suposições normais do fluxo livre da teoria do jato de água. Para ajudar a resolver este problema, um modelo paramétrico para a descrição do comportamento do conjunto hidrojato-casco foi desenvolvido por VAN TERWISGA (1997), que permite a identificação separada da interação entre os termos.

### 2.1.4 Aspectos de manobra do hidrojato

Segundo CARLTON (2012), o princípio do jato de água fornece elevada capacidade de manobra à embarcação, pois trata-se de um sistema de propulsão com capacidade de direção integral. A maioria das unidades de jato de água é equipada com bicos orientáveis ou defletores, que proporcionam um controle direcional do jato.

A capacidade de direção em cada um desses casos é produzida pela reação à mudança do momento do jato, como pode ser observado na figura 3:

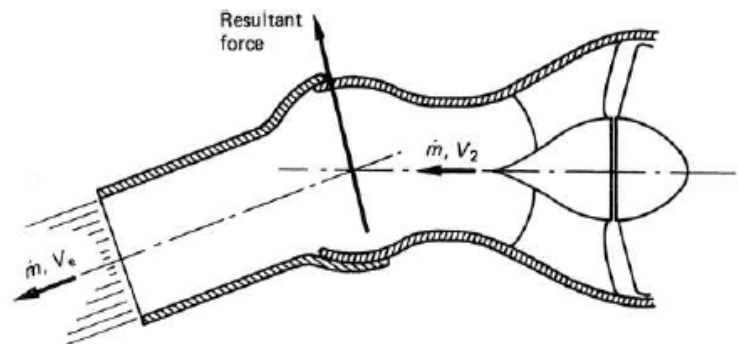


Figura 3 – Princípio da capacidade de manobra do hidrojato. Fonte: CARLTON (2012).

O ângulo através do qual o jato pode ser direcionado é, naturalmente, variável, dependendo do design particular de cada fabricante; no entanto, geralmente espera-se que seja da ordem de  $\pm 30^\circ$ .

Com relação às capacidades de parar, retardar ou reverter o fluxo do jato de água, normalmente essas alterações são obtidas com o auxílio de um reversor, com a força de parada sendo produzido pela mudança de momento.

O design do dispositivo reversor pode ser da forma simples, ou alternativamente, pode ser de uma forma mais sofisticada, que permite um "derramamento" do jato a fim de dar um bom controle às forças de frenagem, conforme ilustra a figura 4:



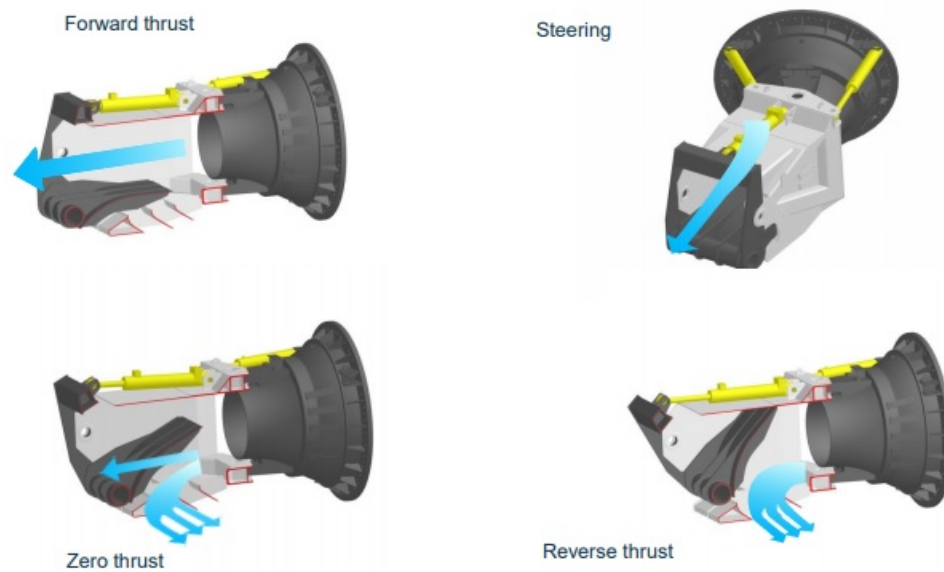


Figura 4 – Mecanismo do controle de empuxo do hidrojato. Fonte: Wärtsilä.

Com este último tipo de sistema, o empuxo resultante também pode ser continuamente variado, do zero ao máximo, em qualquer configuração de energia para o motor.

## 2.2 Propulsão convencional

Segundo TRINDADE (2012), o tipo de propulsor mais comum nos sistemas de propulsão navais é o hélice, que situa-se na popa da embarcação e tem a função de converter o torque em empuxo, permitindo que o navio supere a resistência ao avanço.

Os números de pás geralmente variam de dois a sete, embora em algumas aplicações navais, onde considerações de ruído irradiado se tornaram importantes, números de pás maiores que esses foram pesquisados e usados para resolver uma variedade de problemas de propulsão. (CARLTON, 2007)

Para navios mercantes, no entanto, quatro, cinco e seis pás são geralmente mais usadas, embora muitos rebocadores e navios de pesca usem frequentemente desenhos de apenas três pás. No caso de pequenas embarcações de trabalho ou de lazer, as hélices de duas e três pás tendem a predominar.

Para a maioria dos navios com mais de 100 toneladas de deslocamento, é possível projetar hélices em cujas pás é possível controlar, mas não eliminar, os efeitos da cavitação, que provocam efeito erosivo sobre o material, causando ruídos e vibração, além de prejudicar o desempenho do propulsor.

Segundo CARLTON (2007), existem muito poucos hélices que estão livres de cavitação, uma vez que a maioria apresenta esse fenômeno termodinâmico em alguma posição no disco do hélice.

A Figura 5 ilustra esquematicamente as seções de hélices não cavitantes (a), parcialmente cavitantes (b) e supercavitantes (c).

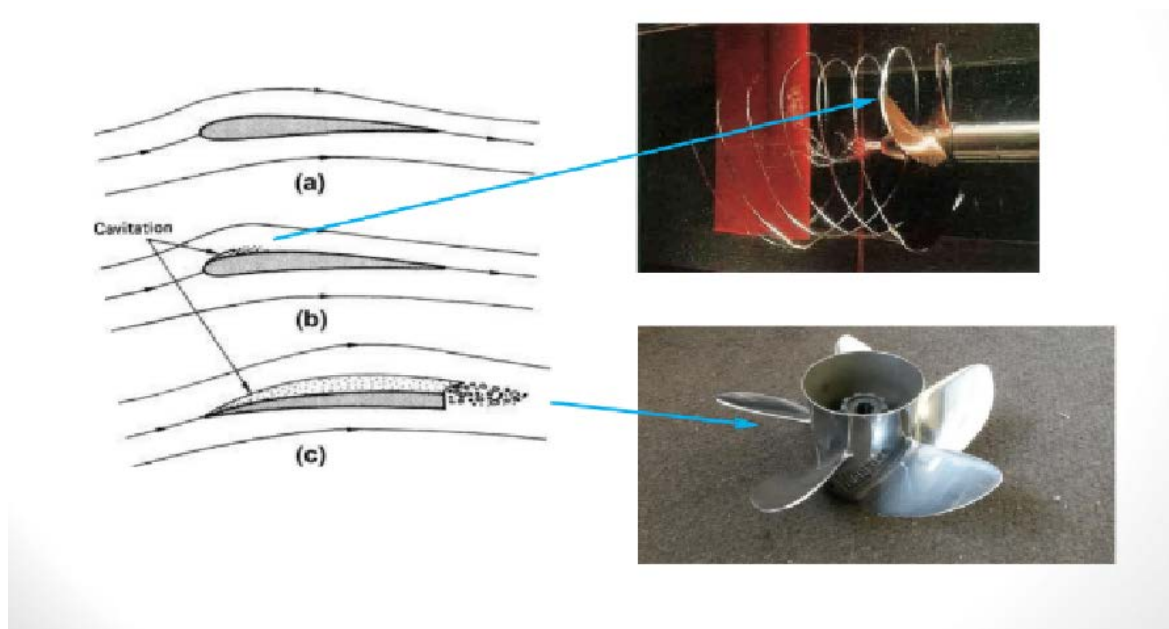


Figura 5 - Regimes de operação do propulsor: (a) – não cavitante; (b) - subcavitante; (c) – supercavitante. Fonte: CARLTON (2007).

### 2.3 Propulsor supercavitante

Segundo CARLTON (2007), para algumas embarcações pequenas de alta velocidade, onde tanto o avanço do hélice quanto as velocidades de rotação são altas e a imersão é baixa, a cavitação, muitas vezes, é impossível de ser contida.

Para superar esse problema, todas ou algumas das seções das pás têm permissão para cavitarem totalmente, de modo que a cavidade desenvolvida na parte de trás da pá se estenda além da borda de fuga e colapse na esteira das pás na corrente de correção. Esses

hélices são denominadas hélices de supercavitação e frequentemente são aplicadas em embarcações de alta velocidade e de lazer.

O motor de popa é um sistema propulsivo que opera com hélices supercavitantes, destinado a possibilitar normalmente o deslocamento de embarcações miúdas, seja em água doce ou salgada. Caracteriza-se por ser independente do casco, sendo acoplado ou fixado depois de sua construção naval.



Figura 6 – Motor de popa convencional, com propulsor supercavitante. Fonte: MercuryMarine.

### **3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HIDROJATO E MOTOR DE POPA CONVENCIONAL**

Neste capítulo, será realizada uma análise comparativa entre os dois sistemas de propulsão em estudo, ressaltando as principais vantagens e limitações do hidrojato em relação ao motor de popa convencional.

#### **3.1 Vantagens da propulsão por hidrojato**

A propulsão por hidrojato é uma tecnologia que proporciona maior velocidade, menor calado e maior manobrabilidade. Garante frenagens instantâneas, realização de curvas fechadas e deslocamento em 360°, partindo de uma posição estacionária. (DE PINHO, 2014).

A seguir, serão analisadas detalhadamente as vantagens do hidrojato em relação ao motor de popa convencional.

##### **3.1.1 Segurança**

Em contraste com o motor de popa convencional, a propulsão por hidrojato não é ameaçada por fragmentos sólidos flutuantes, como troncos, que possam vir a atingir o propulsor diretamente, pois o mesmo encontra-se no interior do casco e possui uma grade de proteção na aspiração, impedindo a entrada de tais fragmentos. Além disso, nadadores e mergulhadores não correm risco de sucção pelo propulsor, o que pode ocorrer com os motores de popa convencionais. Essa vantagem é de grande utilidade para os meios navais militares, que constantemente operam com mergulhadores e pesquisadores, e, muitas vezes, são obrigados a parar máquinas, pois operam com motores de popa convencional.

##### **3.1.2 Manobrabilidade**

Mesmo a uma baixa velocidade, os navios movidos a hidrojato conseguem manter excelente manobrabilidade devido à alta versatilidade de posição espacial do bocal de saída,

que fornece força de empuxo de módulo e direção variável ao navio. Isso é muito útil para navios militares, pois o hidrojato possibilita manobras de giro no próprio eixo em 360°, além de manobras a vante e a ré sem trancos e sem necessidade de total desaceleração.

Com as características citadas, nota-se que o hidrojato oferece vantagens muito importantes aos navios militares, pois oferece maior facilidade em guinadas rápidas, atracação e paradas bruscas, manobras imprescindíveis para navegação segura em vias navegáveis estreitas. Além disso, dispensa, na maioria dos casos, o auxílio de rebocadores, mesmo em condições meteorológicas adversas (vento forte, ondas, corrente).

### 3.1.3 Eficiência

Para analisar a eficiência dos propulsores, será realizada a análise do gráfico 1.

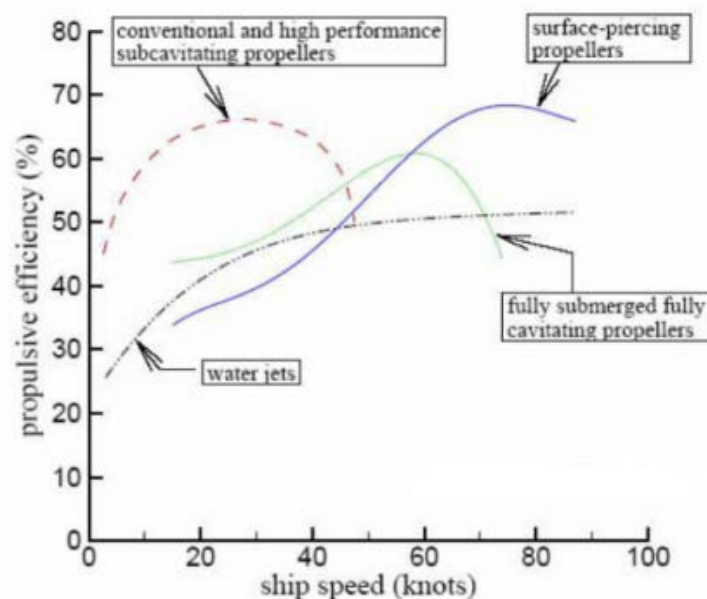


Gráfico 1 - Eficiência de propulsores em relação à velocidade do navio. Fonte: ALLISON (1978).

Analisando o gráfico 1, observa-se que, para velocidades de até 45 nós, os hélices convencionais apresentam maior eficiência que o hidrojato. Porém, verifica-se que a para velocidades superiores a 22 nós, os hélices convencionais apresentam queda em sua eficiência, atingindo sua velocidade máxima em cerca de 45 nós. A partir deste ponto,

justifica-se a utilização de outros tipos de propulsão, como hélices de superfície e supercavitantes.

Os hélices supercavitantes apresentam sua maior eficiência em velocidades de aproximadamente 60 nós. A partir desse ponto, justifica-se o uso de hélices de superfície, que apresentam maior eficiência em velocidades de cerca de 80 nós.

Analisando o hidrojato, nota-se que sua eficiência permanece praticamente constante em velocidades de 40 até praticamente 90 nós. Apesar de hélices supercavitantes e de superfície serem mais eficientes que o hidrojato, não oferecem proteção aos propulsores, o que é imprescindível para operação em regiões de pouca profundidade.

Portanto, analisando os hidrojatos em relação à propulsão convencional de hélices subcavitantes, nota-se que, sem levar em consideração a vantagem de proteção do propulsor, a propulsão por jato d'água se mostra mais eficiente em velocidades acima de 45 nós.

#### 3.1.4 Ruído e cavitação

Em comparação com o motor de popa convencional, o hidrojato garante menor nível de ruído e vibração. (DUARTE, 2017). Esse fator é de extrema importância para embarcações militares, pois, quanto menor o nível de ruído emitido, mais essas conseguem omitir sua assinatura acústica e, conseqüentemente, dificultar a detecção por sensores inimigos.

#### 3.1.5 Aterramento

A manobra de aterramento é muito comum em navegação fluvial, seja ela intencional ou acidental. A propulsão por hidrojato oferece a capacidade de o navio desaterrar ou mesmo desencalhar apenas com o uso do propulsor, pois fornece alto valor de empuxo. Essa característica é muito favorável aos navios militares, pois permite acesso a regiões inóspitas e sinuosas sem colocar em risco a integridade do navio e propulsor.

## 3.2 Limitações do Hidrojato

Segundo DE PINHO (2014, p. 14), o hidrojato possui como desvantagem maior o custo de manutenção e dependência de tecnologia estrangeira. Nesta seção serão abordadas com maiores detalhes as principais limitações do hidrojato.

### 3.2.1 Eficiência em baixas velocidades

Molland et al. (2011) afirma que esse tipo de motor é mais eficiente para embarcações que operam em velocidades acima de 30 nós, caso contrário, propulsores convencionais são mais eficientes.

Como observado gráfico 1, o hidrojato apresenta eficiência muito baixa quando o navio opera em baixas velocidades, por isso seu uso se justifica principalmente em navios que operam em altas velocidades.

### 3.2.2 Custo de manutenção e dependência da tecnologia estrangeira

Embora o hidrojato possibilite melhor desempenho para a embarcação, a dependência de tecnologia estrangeira é um fator limitador, principalmente quando se trata da necessidade constante de manutenção e reposição de peças. (DE PINHO, 2014).

Por se tratar de uma tecnologia ainda pouco utilizada e difundida no Brasil, os custos de implementação e manutenção são muito elevados, pois as peças componentes do sistema são importadas de outros países.

### 3.2.3 Assistência técnica do hidrojato no Brasil

Após levantamento realizado pelo autor, foi constatado que a oferta de assistência técnica em hidrojatos ainda é muito insipiente no Brasil. Dentre os fabricantes que oferecem serviços de manutenção em hidrojatos, destacam-se a *Wärtsilä*, *Hamilton*, *Alamarin* e *RJet*

hidrojatos, sendo esta última uma empresa nacional que projeta e desenvolve propulsores por jatos d'água.

A figura abaixo fornece um panorama da presença de mão de obra especializada em hidrojatos nos distritos Navais da Marinha do Brasil.

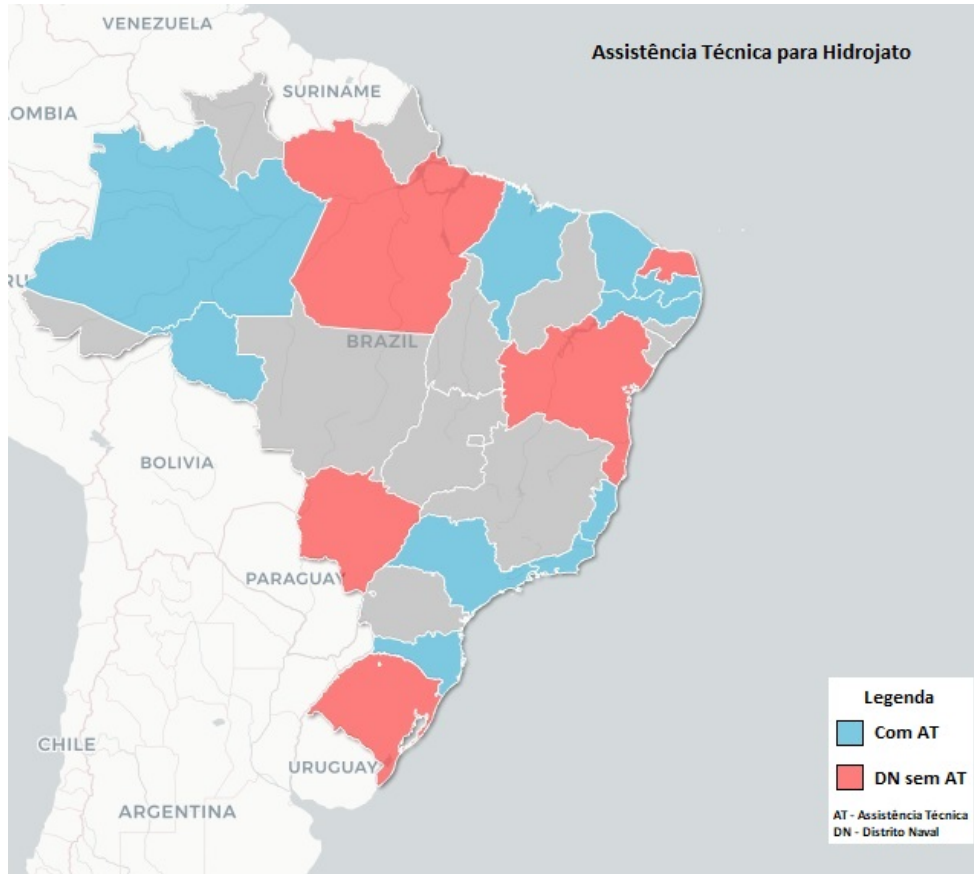


Figura 7 – Estados do Brasil que possuem assistência técnica em hidrojatos. Fonte: Própria (2018).

Analisando os dados da figura, observa-se que apenas 4 dos 9 distritos navais da MB possuem assistência técnica em hidrojato, sendo que apenas 2 desses 4 distritos possuem bases navais (Rio de Janeiro e Manaus). Ressalta-se a ausência de mão de obra especializada nesse ramo em Natal/RN, onde fica sediado um dos navios da classe Amazonas, o Navio-Patrolha Oceânico “Araguari”, que possui duas lanchas PACIFIC 24. No estudo de caso do capítulo subsequente, será abordada a dificuldade de manutenção que os militares da MB enfrentam quando o assunto é manutenção de hidrojatos.

Em face do exposto, em caso de falha ou avaria no hidrojato, o tempo despendido para reparo, muitas vezes, acaba sendo muito elevado, fator que desestimula muitos operadores a utilizarem o jato d'água, mesmo conhecendo todas as vantagens que ele oferece.



Na figura 8 consta uma estimativa de vida útil média dos componentes de um sistema de hidrojato, fornecida pela *Wärtsilä*, na qual pode se observar que o tempo médio de trocas é relativamente curto, o que, aliado à necessidade de importar os sobressalentes, tende a elevar sobremaneira os custos de manutenção do sistema.

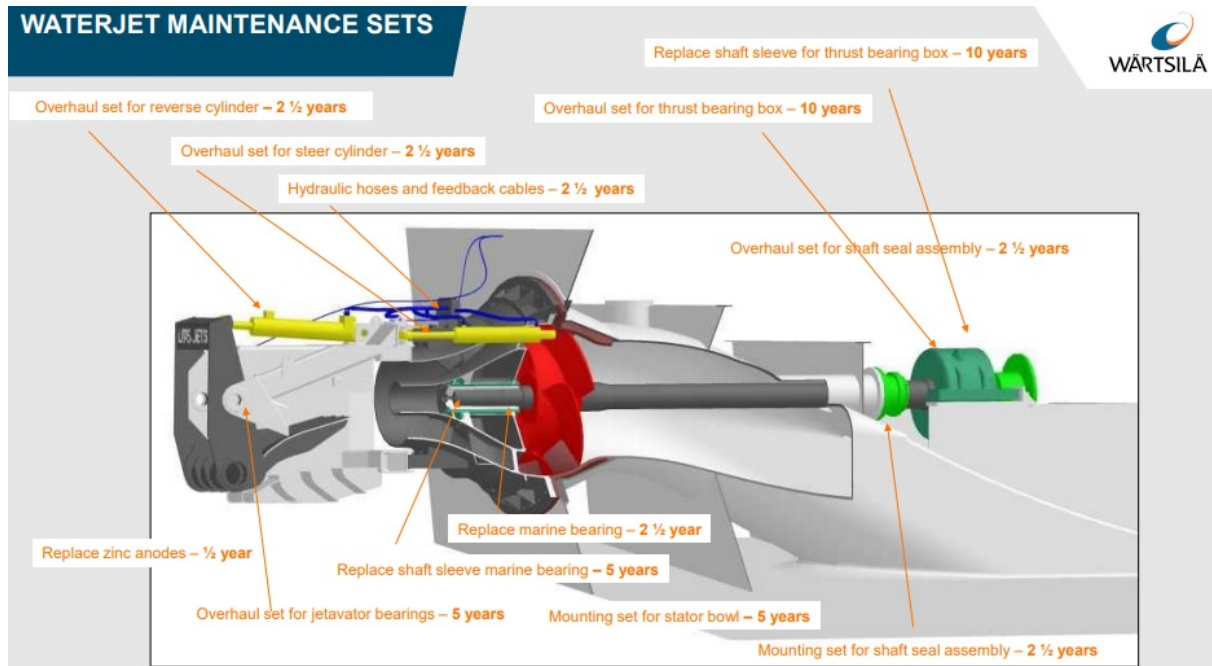


Figura 8 – Vida útil dos componentes do sistema de hidrojato. Fonte: *Wärtsilä*.

Para enriquecer este trabalho, no Anexo 1 consta o cartão de manutenção do hidrojato da lancha Pacific 24, no qual é possível observar os principais procedimentos e períodos de manutenção e a vida útil média de seus componentes.

### 3.3 Marinhas que empregam sistemas de propulsão por hidrojato

Nesta seção, será abordado o uso do hidrojato em diversos meios navais pelas Marinhas mundo afora. Destacam-se o emprego em navios, além de veículos de assalto anfíbios e submarinos.

### 3.3.1 Emprego em navios

Ao longo do século 20, as empresas *Kamewa*, *Hamilton* e *Wartsila*, para citar as de maior expressão, desenvolveram seus modelos de hidrojetos equipando navios comerciais e militares.

Dando um salto no tempo e observando as aplicações contemporâneas de hidrojetos, cita-se as várias embarcações construídas para as forças armadas americanas pelo estaleiro australiano *Incat* e sua subsidiária *Bollinger Shipyards*, empregando hidrojetos de alta performance. Dentre essas embarcações, destaca-se a (HSV-X1) na figura 9, de 1740 toneladas e 112,77 metros, operada pelo Exército e Marinha americanos, que pode atingir velocidades de até 48 nós. O catamarã usa quatro motores diesel marítimos *Caterpillar 3618* com quatro hidrojetos *LJ150D Lips*.



Figura 9 - (HSV-X1). Fonte: Navysite.

Tratando do emprego dos hidrojetos nos navios mais modernos, existe o programa *Littoral Combatant Ship* (LCS) americano. São os maiores navios já construídos que empregam hidrojetos. Temos como exemplo o *USS Freedom* (LCS- 1) e o *USS Independence* (LCS-2).



Figura 10 - USS Freedom (LCS 1). Fonte: Wikipedia

O *USS Freedom* (LCS 1) tem um comprimento total de 115 metros e deslocamento de 3.500 toneladas. Emprega duas turbinas a gás *Rolls-Royce MT30* de 36 MW e dois motores diesel *Fairbanks Morse Colt-Pielstick 16PA6B STC*, alimentando quatro grandes hidrojetos *Rolls-Royce Kamewa*. O *Freedom* tem um casco de aço com superestrutura de alumínio.

O *USS Independence* (LCS 2) tem um comprimento total de 127 metros e deslocamento de 2.637 toneladas. Emprega duas turbinas a gás *General Electric LM2500* de 22 MW e dois motores diesel *MTU 20V8000M90* de 9100 kW, alimentando quatro grandes hidrojetos *Wärtsilä-Lips 2 X LJ160E* e *2 X LJ150E*.



Figura 11- USS Independence (LCS 2). Fonte: Wikipedia.

Na Suécia, os Navios da Classe “*Visby*”, de 610 toneladas e 72,7 metros de comprimento, podem atingir até 34 nós com seu arranjo CODOG composto por quatro turbinas a gás *Honeywell-Vericor TF50A* e um par de motores Diesel *MTU 16V 2000 N90*, alimentando um par de hidrojetos *Rolls-Royce Kamewa 125-SII*. Outros navios, Classe “*Goteborg*” de 420 toneladas, também empregam hidrojetos.



Figura 12 - Navios da Classe “*Visby*”. Fonte: Poder Naval.

Na África do Sul, as Fragatas da Classe “*Valour*”, construídas pela *Blohm + Voss* com o projeto *MEKO A-200SAN*, usam hélices e hidrojato, em um arranjo com três linhas de eixo. As Fragatas têm um comprimento total de 121 metros e deslocamento de 3.700 toneladas. Empregam uma única turbina a gás *GE LM2500* e um par de motores diesel *MTU 16V1163 TB93* que acionam os hélices de passo controlável e um único hidrojato *Lips LJ2 10E* na linha central. Duas fragatas *MEKO A-200AN*, *El Raddi (910)* e *El Moudamir (911)*, foram construídas para a Marinha da Argélia pela *ThyssenKrupp Marine Systems*, em uma modernização do design da Classe “*Valour*”.



Figura 13 - Fragata da Classe “*Valour*”. Fonte: Wikipedia.



Os navios noruegueses da Classe “*Skjold*”, de 280 toneladas e 47 metros de comprimento, têm um arranjo CODOG com duas turbinas a gás *Rolls-Royce Allison 571-KF9*, dois motores *MTU 12V183 TE92*, um par de motores diesel *MTU 6R183 TE52* para alimentação auxiliar e dois hidrojetos *Rolls-Royce Kamewa 80S2*. O *Skjold* pode atingir velocidades de até 55 nós. A Noruega também possui uma classe de Navios Caça-Minas movidos a hidrojato construídos pela *Kvaerner Mandal*.



Figura 14 – Navio da Classe “*Skjold*”. Fonte: Wikipedia.

Os Navios da Classe “*Hamina*” da Marinha Finlandesa, de 250 toneladas e 51 metros de comprimento, têm dois motores *MTU 16V 538 TB93* de 5520 kW, alimentando dois hidrojetos *Rolls Royce Kamewa 90SII*. O *Hamina* pode atingir velocidades acima de 30 nós.



Figura 15 - Navio da Classe “*Hamina*”. Fonte: Wikipedia.

Na Índia, os Navios da Classe “*Car Nicobar*”, de 325 toneladas e 49 metros de comprimento, podem atingir até 35 nós. As embarcações são alimentadas por três hidrojetos

*HamiltonJet HM811*, acoplados aos motores *MTU 16V 4000 M90*, fornecendo uma potência combinada de 8.160 kW.



Figura 16 - Navios da Classe “Car Nicobar”. Fonte: Wikipedia.

Na Coreia do Sul, os Navios da Classe “*Gumdoksuri*”, de 570 toneladas e 63 metros de comprimento, podem atingir até 44 nós com seus arranjos CODAG composto por duas turbinas a gás *Hanwha Techwin/GE LM500* de 4,570 kW e um par de motores *Diesel STX/MTU 16V 1163 TB93* de 5,920 kW, alimentando 3 hidrojetos da *Doosan Heavy Industries*.

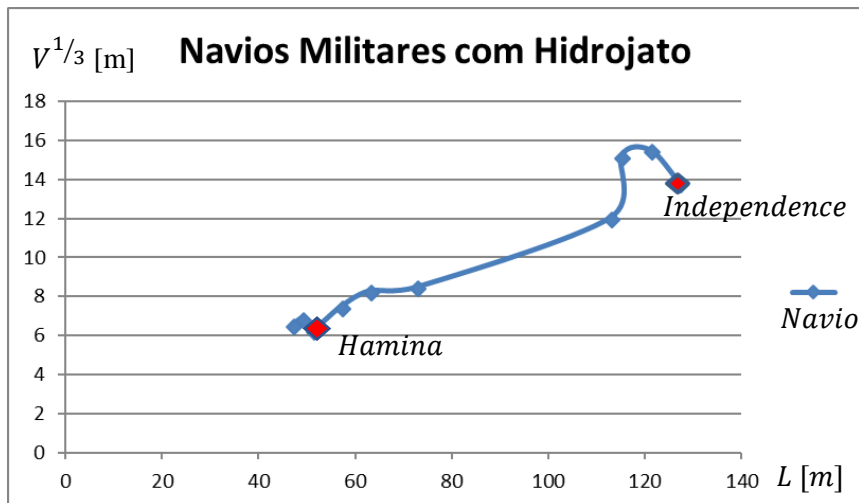


Figura 17 - Navio da Classe “Gumdoksuri”. Fonte: Wikipedia.

Tabela 1 – Dados dos Navios com hidrojoato.

Navio	Volume de Deslocamento [m <sup>3</sup> ] - $V$	Comprimento[m] - $L$	$V^{1/3}$	$L/V^{1/3}$
Skjold	280,8290354	47	6,54858	7,177125
Car Nicobar	325,9622732	49	6,88212	7,119896
Hamina	250,7402102	51	6,30582	8,087771
Goteborg	421,2435531	57	7,49626	7,603796
Gumdoksuri	571,6876792	63	8,29952	7,590801
Visby	611,8061128	72,7	8,48929	8,563733
HSV-X1	1745,151863	112,77	12,0396	9,366611
Freedom	3510,362942	115	15,1979	7,566827
Valour	3710,955111	121	15,4821	7,815501
Independence	2644,807737	127	13,8292	9,183446

Fonte: Própria (2018).

Gráfico 2 – Volume de Delocamento  $V^{1/3}$  x Comprimento  $L$ .

Fonte: Própria (2018).

Observando o gráfico 2 de volume de deslocamento  $V^{1/3}$  por comprimento  $L$  (verifica-se uma continuidade no perfil dos cascos dos navios que utilizam hidrojoato, exceto os cascos do *Hamina* e *Independence*. O primeiro apresenta casco de alumínio e superestruturas de fibra de carbono reforçado, o que contribui para diminuir sobremaneira o deslocamento, tornando-o mais manobrável. Já o segundo, possui um casco trimarã de alumínio leve, o que contribui para a diminuição do seu deslocamento e aumento da estabilidade.

### 3.3.2 Emprego em submarinos

A classe “*Seawolf*” é uma classe de submarinos de ataque rápido movidos a energia nuclear (SSN) a serviço da Marinha dos Estados Unidos. Os submarinos são alimentados por um único reator nuclear *S6W*, fornecendo 45.000 hp (34 MW) a um jato de bomba de baixo ruído, o que contribui para melhorar a assinatura acústica dos submarinos.



Figura 18 - Submarino “*Seawolf*”. Fonte: Wikipedia.

A classe “*Virginia*”, também conhecida como classe *SSN-774*, é uma classe de submarinos de ataque rápido movidos a energia nuclear. O submarino de ataque da classe *Virginia* é a mais nova plataforma de guerra submarina da Marinha dos EUA e incorpora as mais recentes tecnologias de sistemas furtivos, de coleta de informações e armas.

### 3.3.3 Emprego em Veículos de Assalto Anfíbio

A *NAMJet* está fornecendo soluções de propulsão a hidrojato, na fase de teste, para modernização de Veículos de Assalto Anfíbio (AAV) dos Fuzileiros Navais dos EUA. Tal modernização, melhora a mobilidade na água e devido às suas condições de operação, diminui o consumo de combustível e o desgaste do sistema para proporcionar um menor custo de manutenção.



431AAV Specifications		Material Specifications	
MHP:	<b>150-400 (110-294 kW)</b>	Intake, Hood, Steering:	<b>Aluminum</b>
RPM Range @ Jet:	<b>700-1000</b>	Main Shaft & Coupler:	<b>Stainless Steel</b>
Impeller Diameter:	<b>(457mm)</b>	Impeller:	<b>316 Stainless</b>
Thrust Range (Bollard pull):	<b>1460-2300 kgf (14.3-22.6 kN)</b>	Stator Bearing (Water Lubricated):	<b>Thordon Composite</b>
Speed Range:	<b>0-12 kts.</b>	Hardware & Fasteners:	<b>Stainless Steel</b>
Unit Weight (Dry):	<b>160 kg</b>	Wear Ring/Stator:	<b>Aluminum</b>



Figura 19 - Veículos Anfíbio de Assalto *NAMJet 431AAV*. Fonte: *NAMJet*.

O hidrojetado foi projetado para motores na faixa de 150hp a 400hp, com rotor de 457 mm podendo atingir até 12 nós na água.

### 3.3.4 Emprego em Embarcações de Superfície Não-Tripuladas

O Protector USV é uma embarcação de combate naval não-tripulado desenvolvido e produzido pela *Rafael Advanced Defense Systems*. É uma embarcação controlada remotamente e altamente independente. O USV é capaz de realizar várias operações sem revelar sua identidade a uma fonte hostil.

A Marinha da República de Singapura (RSN) adquiriu vários Protector USVs de *Rafael* em 2004. O USV também está operando com a marinha israelense e outras marinhas.

O Protector USV desempenha um papel proeminente na minimização do risco de segurança para os militares das forças armadas, evitando que eles sejam diretamente alvejados em operações potencialmente críticas.



Figura 20 - Protector USV. Fonte: MilitaryEdge.

O Protector USV é projetado em um barco inflável de casco rígido. O design flexível do USV suporta a instalação de vários equipamentos em módulos para executar uma série de missões. O “design” reconfigurável permite que o operador instale os módulos para cada tipo de operação, como: proteção anti-terrorismo, inteligência, vigilância e reconhecimento, guerra anti-submarino, guerra eletrônica e contramedidas, guerra anti-superfície e missões de segurança marítima e portuária.

O Protector USV possui 9m de comprimento, 3,5m de largura e 4,5 m de pontal. A embarcação tem um deslocamento de 4 toneladas e pode atingir velocidades superiores a 30 nós com seu motor diesel, alimentando um propulsor hidrojetado.

### **3.4 Protótipo da Marinha Americana**

Segundo GILES (2010), as futuras aquisições de plataformas navais continuam a ser influenciadas por uma combinação de desenho inovador, capacidade e acessibilidade. As plataformas acionadas por hélice têm tradicionalmente dominado os cascos de navios de combate de superfície devido à alta eficiência e maturidade do sistema. Entretanto, o desenvolvimento da tecnologia de hidrojetado submerso apresenta uma alternativa viável para certas classes de navios, e podem ser particularmente atraentes para aqueles com funções de guerra anti-submarino, onde a acústica submarina é crítica para a integridade do navio. Os méritos dos sistemas de propulsão alternativos devem basear-se na eficiência total da propulsão do navio, e não na eficiência do sistema de propulsão isolado.

Os hidrojetados submersos oferecem um potencial para economia de peso e espaço no sistema de propulsão e podem ser considerados um fator-chave para a propulsão elétrica total (FEP) em plataformas menores (GILES, 2010). Os benefícios em termos de layout geral

e arranjo de maquinário poderiam permitir que usos alternativos do espaço fossem considerados, por exemplo, implementação de sistemas portáteis a bordo, ou até para estações de lançamento e recolhimento embarcações miúdas.

Embora esses sejam benefícios em potencial, existem incertezas com relação à integração e otimização na forma do casco que afetarão a eficiência geral da propulsão quando comparadas aos projetos convencionais de hélices. Em particular, a integração casco-hélice representa uma área em que é necessária uma atenção particular.

Nos últimos anos, a *Rolls-Royce* desenvolveu um hidrojato submerso - o *Advanced WaterJet* ou o *AWJ-21*™.



Figura 21 – Protótipo de Fragata com AWJ-21™. Fonte: GILES (2010).

O *AWJ-21*™ foi testado em escala de modelo e também foi avaliado pela Marinha dos EUA no “Advanced Electric Ship Demonstrator” (AESD). O AESD tem um comprimento de 133 pés (41m) e é alimentado por um pequeno grupo gerador a diesel ou baterias. (GILES, 2010). As baterias eliminam o diesel como fonte de ruído para operações de testes silenciosos e de alta velocidade.

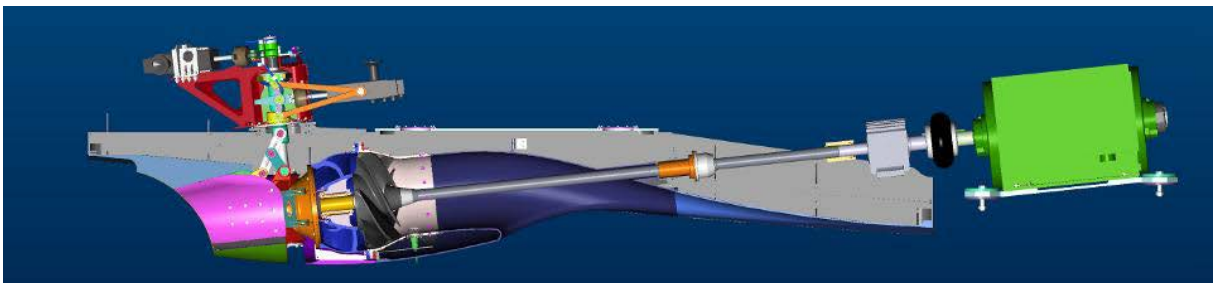


Figura 22 – Advanced WaterJet (AWJ-21™). Fonte: GILES (2010).

Logo, tal protótipo permitiu investigar as questões que envolvem a integração da tecnologia de hidrojato submerso em um conceito de fragata e explorar os méritos dessa

tecnologia no projeto de todo o navio, incluindo a forma do casco, a arquitetura do sistema de propulsão e o arranjo do navio.

### 3.5 Emprego do hidrojato na Marinha do Brasil

Nesta seção, abordaremos o emprego de hidrojato em meios navais da Marinha do Brasil, notadamente as lanchas Pacific 24, embarcações orgânicas dos Navios-Patrolha classe Amazonas, e a mais recente que estão entre os mais novos e modernos da frota brasileira.

#### 3.5.1 Lancha Pacific 24

A PACIFIC 24 é uma lancha tipo casco semirrígido (RHIBRigid Hull Inflatable Boat), fabricada pela *VT Halmatic*. Suas principais funções são resgate, salvamento e ações de visita e inspeção/abordagem, podendo ser usada secundariamente para transporte de material e pessoal.

Seguem abaixo as suas principais características:

- Comprimento: 7,80m;
- Boca: 2,69m;
- Calado: 0,54m;
- Deslocamento: (vazia / carregada) – 2.030kg / 3.190kg;
- Capacidade do tanque de OC: 220 litros de óleo diesel;
- Passageiros: 8 (incluindo 2 da tripulação);
- Motor de centro: Motor *Yanmar 6LYASTP*;
- Propulsão: Hidrojato *Hamilton HJ 241*; e
- Velocidade máxima: 40 nós.



Figura 23 - Militares do NPaOc Amazonas realizando ações de inspeção nas AJB. Fonte: Portal Defesa Aérea e Naval.

De acordo com o documento “Conheça seu navio”, navegando a 20 nós, com carga total, a autonomia da lancha é de até 5,5 horas.

Utiliza o gato de escape *Henriksen* (*Henriksen Hook*) que é liberado automaticamente quando a carga no gato se reduz a um valor entre 25 e 35 kg, o que ocorre quando a lancha toca a água.



Figura 24 - Lancha PACIFIC 24 no berço. Fonte: Portal Defesa Aérea e Naval.

Na figura 24 é possível observar o hidrojato da lancha, além do gato *Henriksen*. Em virtude do sistema de liberação acima descrito, a lancha PACIFIC 24 pode ser lançada com o navio navegando em uma velocidade entre (8) e doze (12) nós, o que aumenta ainda mais a sua versatilidade.

Além disso, a lancha possui uma mini maca (*jason's cradle*) que auxilia no resgate de náufragos.

### 3.5.2 DGS 888 RAPTOR

Segundo (CNH, 2017), a *DGS 888 RAPTOR* é uma embarcação multimissão blindada, projetada para operar em ambientes hostis. Possui o potente motor *FPT Industrial N67 EVO*, que fornece 570 HP a um sistema de propulsão hidrojetado *AlamarinJet AJ340*, e possibilita à embarcação alcançar velocidades superiores a 42 nós, além de apresentar redução de ruídos e vibrações.

A *RAPTOR* tem comprimento total de 9,2 m, cabine blindada e escudos balísticos, todos com nível de proteção NIJ III, capacidade de carga superior a 2 toneladas, radar de alta definição e uma estação para armamento 7,62 mm na proa.

Projetada e construída no Rio de Janeiro, a lancha consiste de uma embarcação Tubular Rígida Híbrida, cuja matéria-prima é um composto termoplástico híbrido de alto peso e ultra-alto peso molecular, conferindo características importantes, como propriedade retardante à chama, ser insubmergível (por ter uma densidade menor que a água) e elevada capacidade de absorver choques.

Suas principais características operacionais são:

- Velocidade máxima: acima de 42 nós;
- Velocidade Econômica de Cruzeiro (VEC): 30 nós;
- Autonomia (VEC): 6 horas;
- Alcance (VEC): 156 MN / 289 Km;
- Comprimento total: 9,20 m;
- Boca máxima: 2,85 m;
- Calado máximo: 0,50 m;
- Deslocamento leve: 4000 Kg;
- Deslocamento máximo: 6000 Kg;
- Lotação: 01 tripulante + 14 passageiros;
- Sistema de motorização: 01 motor centro diesel 570 HP;
- 01 motor centro diesel 570 HP: 01 sistema hidrojetado;
- Capacidade de combustível: 300 litros de óleo diesel.





Figura 25 - DGS RAPTOR 888, embarcação recentemente adquirida pela MB. Fonte: CNH.

### 3.6 Projeto de Corveta Brasileira Moderna

Nesta seção, será abordado o projeto de construção de uma corveta moderna pela Marinha do Brasil, ressaltando o uso do sistema de propulsão por hidrojato em projetos de navios, diferente do projeto adotado nas Corvetas da classe “Tamandaré”.

De acordo com BRICKNELL (2005), o emprego de hidrojetos compensa em termos de eficiência e conseqüentemente em termos financeiros a partir da operação do meio em velocidades predominantemente acima de 25 nós.

O gráfico 3 ilustra a eficiência em função da velocidade do navio de um modo geral. Isso ocorre porque, em altas velocidades, o fluxo de água sobre o duto de admissão aumenta, reduzindo o trabalho necessário a ser atendido pelos impelidores.

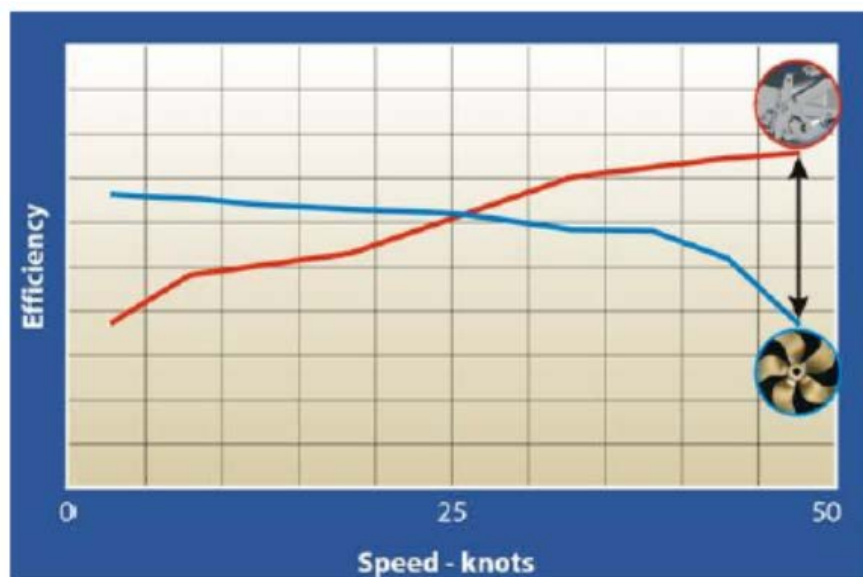


Gráfico 3 - Eficiência de hidrojetos e propulsores convencionais. Fonte: ALLISON (1993).

A fim de que verificar a possibilidade de se obter uma propulsão economicamente mais viável para velocidades mais baixas, JÚNIOR et al. (2016) realizaram um estudo sobre arranjos propulsivos mesclados, utilizando hélices e hidrojetos. Assim, pode-se empregar os hélices para velocidades mais baixas e hidrojetos a velocidades mais altas.

Um dos exemplos de aplicação de arranjos propulsores mesclados é o da fragata Sul-Africana SAS “*Amatola*”, de 3700 toneladas, que pode operar a velocidade de 28 nós. A fragata possui 2 hélices de 5 pás acoplados a 2 motores de 5900 kW, e entre os hélices há um hidrojato ligado a uma turbina de 20.000 kW. Esse tipo de arranjo é chamado CODAG WARP (Combined Diesel and Gas - Water Jet and Refined Propeller). Apesar de esse exemplo corresponder a uma velocidade menor que a requerida pelo projeto de corveta, o deslocamento do navio sul-africano é maior que o brasileiro, portanto foi realizado um teste para verificar a viabilidade desse arranjo propulsivo.

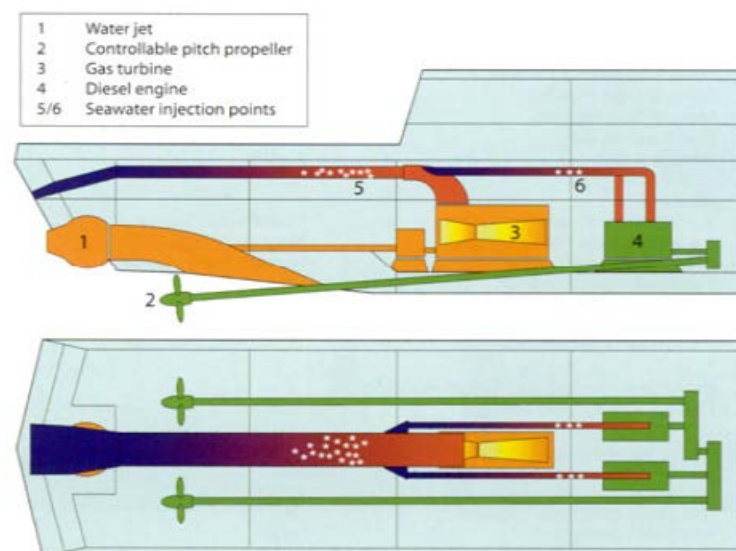


Figura 26 - CODAG WARP. Fonte: Naval-Technology

JÚNIOR et al. (2016) realizaram cálculos para toda a faixa de velocidades da corveta (até 35 nós), e observaram um aumento significativo do índice de cavitação para velocidades acima de 22 nós, como ilustra o gráfico 4 abaixo:



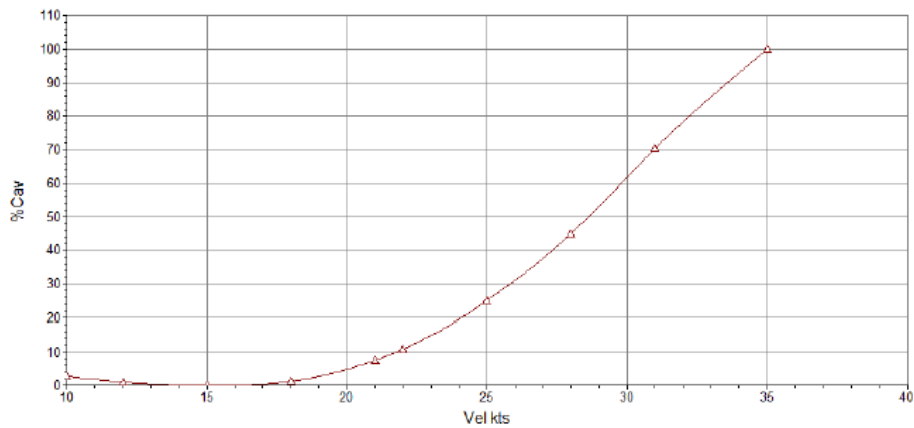


Gráfico 4 - Velocidade x Índice de cavitação. Fonte: JUNIOR et al. (20116).

Logo, a partir da velocidade de 22 nós, foram feitas as análises para o arranjo mesclado. Para que os hélices operem em um nível de cavitação aceitável, é preciso reduzir o empuxo requerido pelos mesmos. Assim, foi feita a análise de sensibilidade para o arranjo mesclado, variando a parcela do empuxo que será utilizado pelo hélice para atender a resistência requerida, sendo o restante atendido pelos hidrojetos.

Com essa configuração, a curva de cavitação fica conforme o gráfico abaixo:

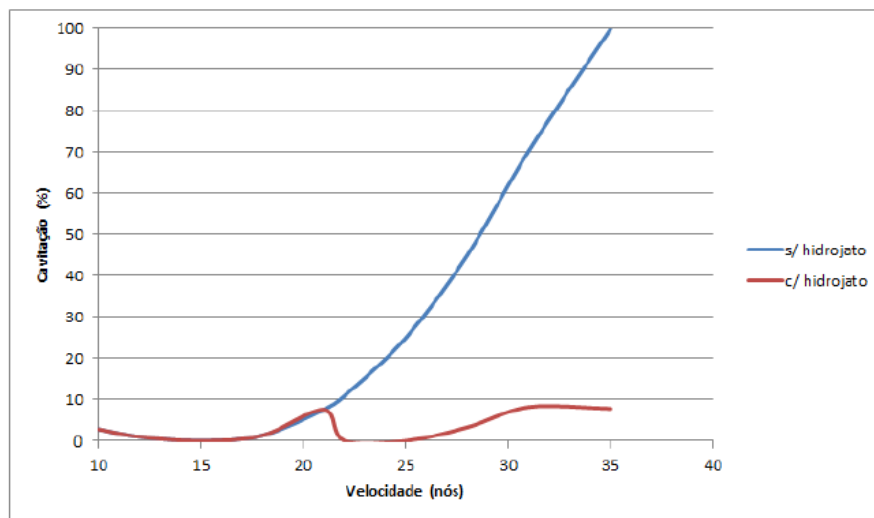


Gráfico 5 - Comparativo das cavitações entre os casos com e sem hidrojetos. Fonte: JUNIOR et al. (2016).

Após os testes realizados, JUNIOR et al. (2016), chegaram à conclusão de que 2 motores *MTU 16V 1163 M94* (um por eixo) forneceriam potência aos hélices.

Já para atender à potência requerida pelos hidrojetos, foi selecionada a turbina *GE LM2500+G4*. A figura a seguir apresenta as principais características dessa turbina.

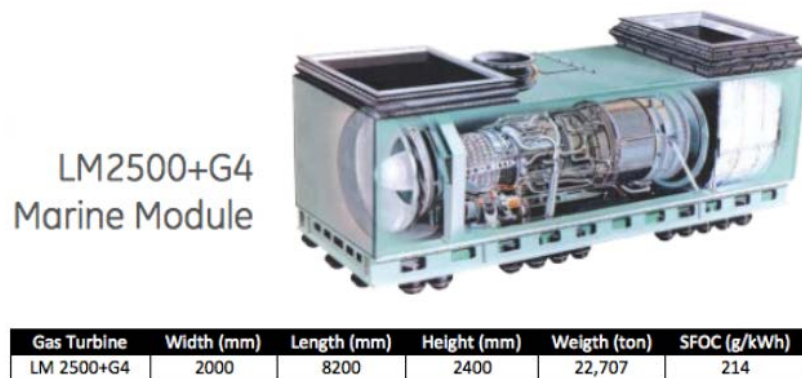


Figura 27 – Características principais da turbina *LM2500+G4* (General Electric). Fonte: JÚNIOR et al. (2016)

As admissões do hidrojato foram posicionadas de forma a influenciar o menos possível a eficiência do hélice. Foi adicionada uma praça de máquinas para a turbina do hidrojato e suas redutoras. O eixo da turbina aciona a redutora principal, dividindo a carga entre outras duas redutoras, acionando cada uma um eixo do impelidor do hidrojato.

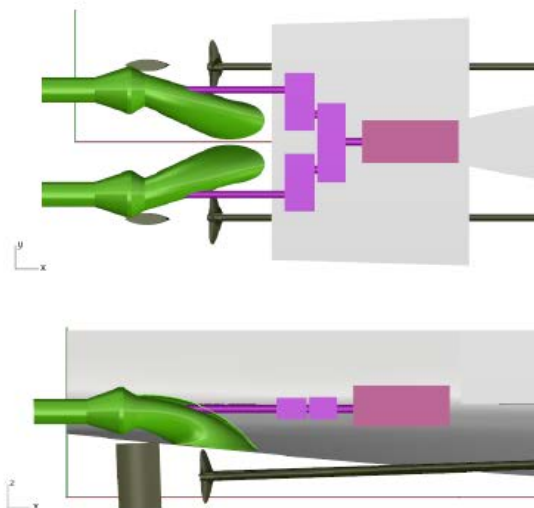


Figura 28 - Arranjo do hidrojato e turbina. Fonte: JÚNIOR et al. (2016)

Para o dimensionamento com maiores detalhes do sistema de hidrojetos, deve-se saber o tamanho do duto de entrada do mesmo. De acordo com o catálogo da *Rolls Royce*, o tamanho do duto depende da potência requerida pelo hidrojato na velocidade máxima mantida do navio. Assim JÚNIOR et al. (2016), chegaram à conclusão de que o diâmetro do duto deveria ser de 1,8 m.

Dutos maiores injetam mais massa de água no hidrojato, fazendo com que seja necessária uma rotação menor para atender a potência requerida. Baseado nisso, pode-se

dimensionar a quantidade de rotações por minuto (RPM) do impelidor do hidrojato a fim de que se selecione uma redutora adequada para a turbina.

Assim, utilizando o gráfico abaixo, JÚNIOR et al. (2016), obtiveram o diâmetro do duto, a potência requerida e a rotação do impelidor.

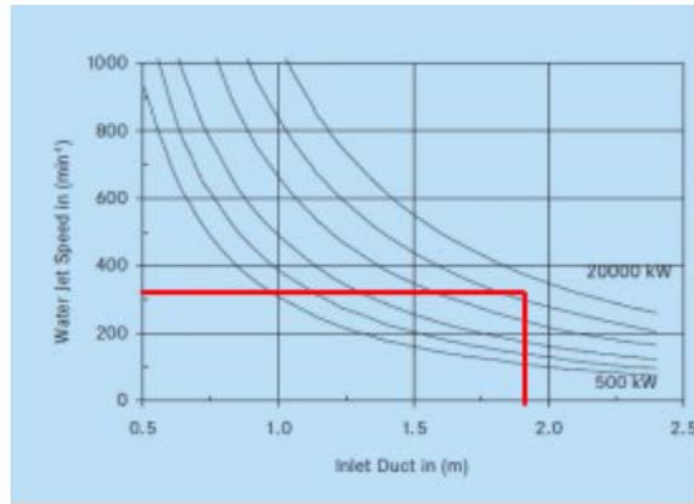


Gráfico 6 - RPM do impelidor do hidrojato (*Rolls Royce catalogue*). Fonte: JÚNIOR et al. (2016).

Assim, foram obtidos o diâmetro do duto de 1,8 m e uma rotação máxima de 320 RPM para a velocidade de 35 nós.

### 3.7 Estudo de caso das lanchas Pacific 24

Em agosto de 2016, foi verificada avaria em um componente do sistema de resfriamento da lancha Pacific 24 de bombordo, do NPaOc “Araguari”, sediado em Natal/RN. A avaria aconteceu na tampa do recipiente componente do sistema de resfriamento de água salgada do motor, com consequente alagamento da lancha de bombordo. Devido ao alagamento, ocorreu presença de água salgada na engrenagem redutora, assim como nos cilindros do motor.

A água que embarcou na lancha foi suficiente para cobrir completamente a redutora, que apresentava bastante água salgada no seu interior. O motor foi desmontado por completo pelo pessoal de bordo e foram observadas avarias na conectora, anéis e camisa do cilindro nº1.

Devido à falta de assistência técnica na capital potiguar e ao fato de os sobressalentes terem que ser importados, a avaria demorou praticamente quatro meses para ser sanada, período em que, conseqüentemente, a lancha permaneceu inoperante.



Figura 29 – Vista do Motor da lancha Pacific 24 aberto, após a avaria. Fonte: Própria (2016).

Outro navio da classe Amazonas, o NPaOc “Apa” também passou por problemas com as lanchas PACIFIC. Foi averiguado que o eixo do hidrojato havia empenado, e que a bucha do eixo estava avariada. A lancha permaneceu inoperante por cerca de seis meses, período em que os sobressalentes para o reparo demoraram para chegar.

Após a chegada dos sobressalentes, o reparo citado acima foi realizado através da substituição dos componentes e durou apenas um dia. Foi recomendado pela empresa autorizada que não se deve engrazar o eixo do hidrojato a seco por mais de 30 segundos, pois a bucha vai se desgastando mais rápido.

#### 4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HIDROJATO E PROPULSÃO CONVENCIONAL

Segundo CARLTON (2007), uma comparação adequada entre hidrojato e hélice convencional só pode ser feita em termos do coeficiente quasi-propulsivo. Em face do exposto, neste capítulo, será feita uma análise comparativa entre as eficiências quasi-propulsivas do hidrojato e de um propulsor convencional para proporcionar o mesmo empuxo ao navio.

Holtrop propôs uma série de formulações matemáticas que foram obtidas através de regressões baseadas em modelos aleatórios e dados em escala real no Netherlands Ship Model Basin. (VON MONFORT, 2014).

Para a análise proposta, serão usados dados obtidos a partir do método Holtrop para o Navio-Patrolha Grajaú, utilizando os resultados encontrados pelo 1T Igor Pinheiro de Araújo Costa, por ocasião de seu Trabalho de Conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval. Para a estimativa da resistência por este método, serão necessários alguns valores do Navio-Patrolha Grajaú, obtidos a partir do contrato de aquisição do meio. Como as fórmulas de Holtrop são válidas para formas típicas de navios mercantes, os resultados para formas diferentes das convencionais, como é o caso de um navio militar, tendem a ser pouco coerentes. Somente os valores de coeficiente de esteira ( $w$ ), de redução da força propulsiva ( $t$ ), força propulsiva requerida ( $T$ ), velocidade de avanço ( $V_a$ ) e coeficiente de avanço ( $J$ ) foram utilizados.

O propulsor considerado o mais eficiente possível pelo 1T Igor, considerando o navio operando com apenas 1 eixo, através do método Holtrop, possui 2 pás, diâmetro de 1,65m, razão de áreas igual a 1,05 e os seguintes parâmetros:

Tabela 2 - Parâmetros de operação do propulsor operando nas três velocidades analisadas.

$V_s$ (nós)	$V_a$ (m/s)	$T$ (N)	$K_T$	$n$ (RPS)	RPM	$J$	$P/D$	$\eta_0$ (%)
12	5	60000	0,493595993	4	240	0,757576	0,95	54
21	9	182300	0,462873197	7,2	432	0,757576	0,95	49
35	15,12	262600	0,345648821	10	600	0,916364	0,95	44

Fonte: Própria (2018).

Serão comparados o propulsor convencional e o hidrojato operando em três faixas de velocidades: 12, 21 e 35 nós. Os dados obtidos através do método Holtrop constam no Apêndice A.

Para os cálculos a seguir, serão consideradas as seguintes premissas:

- O ângulo de inclinação vertical e horizontal do hidrojato serão considerados iguais a zero;
- “Vena contracta” ocorre no plano de saída do bocal ( $A_j=A_n$ );
- A velocidade de avanço é uniforme ( $V_a = (1 - w)V_s$ );
- As perdas da bomba são incluídas nas perdas do estator;
- O coeficiente de esteira ( $w$ ) e de redução da força propulsiva ( $t$ ) foram obtidos pelo Holtrop e considerados iguais para os dois propulsores;
- O coeficiente de pressão ( $C_p$ ) foi considerado igual a 0,07, com base nos experimentos de ALLISON (1993).
- $h_j$  foi considerado igual a 0,06584, com base em ALLISON (1993);
- A área do jato  $A_j$  foi considerado igual a 2,7449 m<sup>2</sup>, obtida para um hidrojato operando para proporcionar um empuxo requerido para o NPa Grajaú demandar a velocidade de serviço (12 nós).

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_{rr} \quad (Eq. 12)$$

$$\mu = (1 - w) \frac{V_s}{V_j} \quad (Eq. 13)$$

$$\eta_D = \frac{\eta_P \cdot \eta_{rr} \cdot \left(\frac{1-t}{1-w}\right) \cdot 2\mu(1-\mu)}{1 + \psi - (1-\zeta)\mu^2 + \frac{2gh_j}{V_j^2} - \frac{C_P \cdot \mu^2}{(1-w)^2}} \quad (Eq. 14)$$

Após a aplicação dos cálculos, obtém-se a eficiência quasi-propulsiva para o hélice convencional e o hidrojato, conforme a tabela 3:

Tabela 3 – Resultados dos cálculos de eficiência quase-propulsiva.

Vs [nós]	Propulsor Convencional		Hidrojato	
	$\eta_0$	$\eta_{rr}$	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	$\eta_D$
12	$\eta_0$	0,54	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,4483
	$\eta_{rr}$	0,99	$\eta_{rr}$	1
	$\eta_H$	0,97619	$\eta_H$	0,97619
	$\eta_D$	0,521871	$\eta_D$	0,437626
21	$\eta_0$	0,49	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,4801
	$\eta_{rr}$	0,99	$\eta_{rr}$	1
	$\eta_H$	0,97608	$\eta_H$	0,97608
	$\eta_D$	0,473496	$\eta_D$	0,468616
35	$\eta_0$	0,44	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,537666
	$\eta_{rr}$	0,99	$\eta_{rr}$	1
	$\eta_H$	0,975958	$\eta_H$	0,975958
	$\eta_D$	0,425127	$\eta_D$	0,524739

Fonte: Própria (2018).

Avaliando os resultados da tabela 3, conclui-se:

- 1) Para a velocidade de 12 nós, o propulsor convencional apresentou maior eficiência que o hidrojato;
- 2) Para a velocidade de 21 nós, os dois propulsores apresentaram eficiências muito próximas, com uma ligeira vantagem para o convencional (cerca de 1%);
- 3) Para a velocidade de 35 nós, o hidrojato mostrou-se muito mais eficiente que o convencional.

As conclusões obtidas corroboram com os gráficos 1 e 3, que apesar das velocidades limites serem diferente, mostram que a análise proposta é confiável para altas velocidades.

## 5. CONCLUSÃO

Com o que foi exposto, torna-se evidente que o sistema de propulsão por hidrojato pode ser muito útil para os navios da Marinha do Brasil, principalmente para operação em regiões com pequenas profundidades, com fragmentos sólidos flutuantes, como troncos, que possam vir a atingir o propulsor diretamente, e terrenos sinuosos, como o pantanal e rios da região Norte do país. A alta capacidade de manobrabilidade e velocidade proporcionadas pelo hidrojato seriam muito úteis para o cumprimento da missão da MB nessas áreas.

Com relação à análise comparativa entre hidrojato e hélice convencional, ficou claro que a velocidade do navio é fator primordial para avaliar que tipo de propulsor é mais eficiente. Portanto, antes de escolher o propulsor mais adequado, torna-se necessária a determinação da velocidade de operação do navio. Ficou claro também que a instalação de hidrojato se justifica em embarcações que despendem velocidades elevadas (em torno de 40 nós), principalmente embarcações miúdas, como lanchas orgânicas de navios maiores.

Ao abordar as desvantagens do jato d'água, verifica-se que elas envolvem basicamente alto custo de implantação e dificuldade de mão de obra qualificada para manutenção do sistema. A tendência, entretanto, é que a situação melhore com o passar do tempo, pois o hidrojato oferece vantagens de operação que justificam sua escolha.

Analisando o estudo de caso, nota-se que o número de avarias é pequeno em relação ao tempo de operação dos hidrojatos. Isso se justifica pelo fiel cumprimento das rotinas de manutenção pelos militares dos navios da Marinha do Brasil. As avarias que ocorreram foram fatalidades, porém levaram muito tempo para serem sanadas, pois os sobressalentes tiveram que ser importados (com custo bastante elevado) e a manutenção foi realizada pelos próprios militares de bordo, o que corrobora com os fatores descritos como desvantagens do hidrojato (alto custo e dificuldade de manutenção).

Com o que foi exposto a respeito do projeto de construção da corveta nacional, foi possível observar que a MB vislumbra a implementação do sistema de propulsão por hidrojato também em navios-escolta, sendo usado principalmente em arranjos híbridos, aproveitando o fato de cada propulsor apresentar determinada faixa de maior eficiência, e que essas faixas se complementam.



## **5.1 Considerações Finais**

O uso de sistemas de propulsão por hidrojetos é um assunto muito amplo, tendo em vista a vasta gama de embarcações que podem utilizá-lo. Neste trabalho, foram abordados apenas os usos militares do hidrojato, e foi verificado que esse propulsor é cada vez mais utilizado para esse âmbito, pois oferece vantagens operativas e funcionais muito importantes para tal fim.

## **5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos**

Os trabalhos futuros poderiam abordar temas mais específicos e modernos relativos ao hidrojato, como por exemplo:

- Emprego de hidrojato em submarinos e suas vantagens/desvantagens;
- Arranjos de propulsão híbridos de hidrojetos com motores diesel;
- Arranjos de propulsão híbridos de hidrojetos com turbinas a gás;
- Arranjos de propulsão híbridos de hidrojetos com motores diesel-elétricos;
- Modernização de veículos de assalto anfíbio com o uso de hidrojato;
- Emprego de hidrojato em embarcações não-tripuladas e autônomas.

## REFERÊNCIAS

ALLISON, John L. **Propellers for high-performance craft**. Marine Technology Society Journal, v. 15, n. 4, 1978.

ALLISON, J. (1993). **Marine Waterjet Propulsion**. *SNAME*.

BRICKNELL, D. e. (2005). **Consideration in the Selection of Propulsion Systems for Fast Naval Ships**. *Internacional Conference on Fast Sea Transportation*.

BULTEN, Norbert Willem Herman. **Numerical analysis of a waterjet propulsion system**. Dissertation Abstracts International, v. 68, n. 02, 2006.

CARLTON, J. (2007). **Marine propellers and propulsion**. Oxford: Butterworth-Heinemann

CARLTON, John. **Marine propellers and propulsion**. Butterworth-Heinemann, 2012.

DE PINHO, Marcio Sousa. **AS EMBARCAÇÕES RÁPIDAS E LEVEMENTE BLINDADAS NAS OPERAÇÕES FLUVIAIS NO AMBIENTE OPERACIONAL DO PANTANAL**.

DUARTE, Lucas Luz et al. **Projeto conceitual de uma embarcação do tipo catamarã para transporte de passageiros na região de Manaus**. 2017.

GILES, Will et al. **The advanced waterjet: propulsor performance and effect on ship design**. In: IMarEST. 10th International Naval Engineering Conference and Exhibition. London: IMarEST. 2010. p. 1-19.

JÚNIOR, Jorge; BIZARRO, Rafael; OLIVEIRA, Rodrigo; NUNES, Rodrigo; SILVA, Rubens; SANTOS, Thadeu; MARCHIONE, Thiago. **PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UMA CORVETA CONVENCIONAL E DE UMA CORVETA MODERNA**. 2016. 594p. USP, São Paulo, 2016.

KRUPPA, C., Brandt, H., and Ostergaad, C., 1968, “**Wasserstrahlantriebe für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge**“, Jahrbuch der STG 62, pp. 228-258.

**MANUAL MARINE PROPULSION UNITS MODEL HJ-241**. New Zealand, Hamilton Jet, 2002.

MARINHA DO BRASIL. CAAML - DIASA. **CONHEÇA SEU NAVIO NAVIO-PATROLHA OCEÂNICO CLASSE AMAZONAS**. Rio de Janeiro: [s.n], 2013. 120 p. v. 2.

MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. USA: Cambridge University Press, 2011

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: engenharia de máquinas marítimas**. [S. l.]: ENIDH, 2012.

VAN TERWISGA, J. C. **A parametric propulsion prediction method for waterjet driven craft**. In: 1997. FAST'97 conference proceedings. 1997.

VON MONTFORT, Gustavo. **SELEÇÃO DE SISTEMA PROPULS. USO DE FORMULAÇÕES CLÁS**. 2014.

**DGS Defense lança embarcação blindada para operação militar na Amazônia com motor FPT Industrial**. Disponível em <http://www.cnhpress.com/pagina/352/visualizarelease.aspx?codigo=Mjc1NQ==&Titulo=DGS%20Defense%20lan%E7a%20embarca%E7%E3o%20blindada%20para%20opera%E7%E3o%20militar%20na%20Amaz%F4nia%20com%20motor%20FPT%20Industrial>. Acesso em: 17 de junho de 2018.

**ISRAEL NAVY READIES FOR THIRD-GENERATION USV**. Disponível em: <https://militaryedge.org/articles/israel-navy-readies-third-generation-usv/>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

**Joint Venture (HSV-X1)**. Disponível em: <https://www.navysite.de/ships/hsv-x1.htm>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

**Motor de Popa Mercury.** Disponível em: <https://www.velamar.com.br/motor-de-popa-15-hp-super-mercury-marine.html>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

**NAMJet Chosen to Replace Waterjet Propulsion for Amphibious Assault Vehicles.** Disponível em: <https://www.shiptechnology.com/contractors/propulsion/namjet/pressreleases/pressamphibious-assault-vehicles/>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

**NPaOc Amazonas, o pioneiro.** Disponível em: <http://www.defesaaereanaval.com.br/npaoc-amazonas-o-pioneiro/?print=print>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

**Protector Unmanned Surface Vehicle (USV).** Disponível em: <https://www.naval-technology.com/projects/protector-unmanned-surface-vehicle/>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

**Seawolf-class submarine.** Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Seawolf-class\\_submarine](https://en.wikipedia.org/wiki/Seawolf-class_submarine). Acesso em: 17 de junho de 2018.

**Valour-class frigate.** Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Valour-class\\_frigate](https://en.wikipedia.org/wiki/Valour-class_frigate). Acesso em: 19 de junho de 2018.

**Visby:** as corvetas stealth suecas. Disponível em: <http://www.naval.com.br/blog/2008/12/09/visby-as-corvetas-stealth-suecas/>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

**Virginia-class submarine.** Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Virginia-class\\_submarine](https://en.wikipedia.org/wiki/Virginia-class_submarine). Acesso em: 17 de junho de 2018.

**Wärtsilä introduces new waterjet series for ferries, yachts and naval vessels.** Disponível em: <https://www.wartsila.com/media/news/02-03-2011-wartsila-introduces-new-waterjet-series-for-ferries-yachts-and-naval-vessels>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

**Why New Warships Will be Powered by Waterjets.** Disponível em: <https://www.marinelink.com/news/waterjets-warships312784>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

## APÊNDICE A - Método Holtrop para o Navio-Patrolha Grajaú

Planilha de Cálculo do Método de Estimativa de Potência Propulsiva por J. Holtrop e G.G.J. Mennem e seleção de propulsor Série_B					
Dos trabalhos:		A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. (J.Holtrop)			
		Further Computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. (MWC Oosterveld)		<b>RT (KN)</b> <b>48,600</b>	
OBS: Apenas os valores em azul devem ser modificados.					
<b>Características Principais do Navio:</b>		<b>Dados do propulsor Série B:</b>		<b>Cálculo</b>	
Tipo do Navio: Navio Patrulha Grajaú		Diâmetro do Propulsor: (m)	1,65	Coef. Força Propulsiva (KTs):	-0,35273
Comp. perpendiculares: (m)	42,50	Número de Pás do Propulsor:	3	Coef. Torque (KQs):	-0,00563
Comp. Linha D'água: (m)	42,50	Profundidade do eixo (m):	1,425	Coef. avanço (J):	1,8784
Boca Moldada: (m)	7,50	Rotação:	100,0	Veloc. avanço (Va) [m/s]:	5,1656
Calado Moldado na PV: (m)	2,250	Razão de Áreas Fa/F:	0,74	Torque do propulsor (Q) [KN.m]	-0,20
Calado Moldado na PR: (m)	2,250	Razão passo diâmetro:	0,75	Diferença Forças Propulsivas	-66,796
Vol. Desloc. Moldado: (m3)	252,70	<b>RESULTADOS</b>			
LCB rel. à PR: (m)	18,00	<b>CASCO:</b>			
Área Transv. do Bulbo (m2):	0,00	Coef. Esteira (w):	0,16324	Eficiência propulsiva:	0,000977
Altura Centro Área Bulbo: (m)	0,00	Coef. Red. Força Prop. (t):	0,18116	Potência por hélice (THP):	-50,44
Coef. Seção Mestra:	0,7000	Efic. Rot. Relativa ( $\eta_r$ ):	0,99862	Potência por eixo (PHP):	-50.441,83
Coef. Linha D'água:	0,7500	Potência Efetiva (EHP):	402,3	Potência por motor (BHP):	-51.021,57
Área Transom: (m2)	10,00	Eficiência do casco:	0,97859		
Área Apêndices: (m2)	10,00	<b>PROPULSOR:</b>		<b>MOTOR:</b>	
Parâmetro Forma de Popa:	-10	Rend. águas abertas ( $\eta_0$ ):	0,0010	Margem de rotação (%):	5,00
Velocidade de serviço (nós)	12,00	Força Propulsiva (KN):		Margem de mar (%):	15,0
Eficiência Mec.Transmissão:	0,990	Requerida:	59,4	Margem de motor (%):	10,0
Quantid. motores:	1	Disponível:	-7,4	Pot. Req. motor (MCR) [HP]	-64542,29
Quantid. propulsores:	1	Cavitação:	5 % dorso	ok	113,56

Planilha de Cálculo do Método de Estimativa de Potência Propulsiva por J. Holtrop e G.G.J. Mennem e seleção de propulsor Série_B					
Dos trabalhos:		A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. (J.Holtrop)			
		Further Computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. (MWC Oosterveld)		<b>RT (KN)</b> <b>147,963</b>	
OBS: Apenas os valores em azul devem ser modificados.					
<b>Características Principais do Navio:</b>		<b>Dados do propulsor Série B:</b>		<b>Cálculo</b>	
Tipo do Navio: Navio Patrulha Grajaú		Diâmetro do Propulsor: (m)	1,65	Coef. Força Propulsiva (KTs):	0,41863
Comp. perpendiculares: (m)	42,50	Número de Pás do Propulsor:	3	Coef. Torque (KQs):	0,25195
Comp. Linha D'água: (m)	42,50	Profundidade do eixo (m):	1,425	Coef. avanço (J):	3,2945
Boca Moldada: (m)	7,50	Rotação:	100,0	Veloc. avanço (Va) [m/s]:	9,0599
Calado Moldado na PV: (m)	2,250	Razão de Áreas Fa/F:	0,74	Torque do propulsor (Q) [KN.m]	8,77
Calado Moldado na PR: (m)	2,250	Razão passo diâmetro:	0,75	Diferença Forças Propulsivas	-171,864
Vol. Desloc. Moldado: (m3)	252,70	<b>RESULTADOS</b>			
LCB rel. à PR: (m)	18,00	<b>CASCO:</b>			
Área Transv. do Bulbo (m2):	0,00	Coef. Esteira (w):	0,16138	Eficiência propulsiva:	0,849505
Altura Centro Área Bulbo: (m)	0,00	Coef. Red. Força Prop. (t):	0,18116	Potência por hélice (THP):	104,76
Coef. Seção Mestra:	0,7000	Efic. Rot. Relativa ( $\eta_r$ ):	0,99862	Potência por eixo (PHP):	120,25
Coef. Linha D'água:	0,7500	Potência Efetiva (EHP):	2143,6	Potência por motor (BHP):	121,63
Área Transom: (m2)	10,00	Eficiência do casco:	0,97641		
Área Apêndices: (m2)	10,00	<b>PROPULSOR:</b>		<b>MOTOR:</b>	
Parâmetro Forma de Popa:	-10	Rend. águas abertas ( $\eta_0$ ):	0,8712	Margem de rotação (%):	5,00
Velocidade de serviço (nós)	21,00	Força Propulsiva (KN):		Margem de mar (%):	15,0
Eficiência Mec.Transmissão:	0,990	Requerida:	180,7	Margem de motor (%):	10,0
Quantid. motores:	1	Disponível:	8,8	Pot. Req. motor (MCR) [HP]	153,86
Quantid. propulsores:	1	Cavitação:	5 % dorso	ok	113,56

Planilha de Cálculo do Método de Estimativa de Potência Propulsiva por J. Holtrop e G.G.J. Mennem e seleção de propulsor Série_B				
Dos trabalhos:		A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. (J.Holtrop) Further Computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. (MWC Oosterveld)		<b>RT (KN)</b> <b>215,013</b>
OBS: Apenas os valores em azul devem ser modificados.				
Características Principais do Navio:		Dados do propulsor Série B:		Cálculo
Tipo do Navio: <b>Navio Patrulha Grajaú</b>		Diâmetro do Propulsor: (m)	1,65	Coef. Força Propulsiva (KTs): <b>7,81269</b>
Comp. perpendiculares: (m)	42,50	Número de Pás do Propulsor:	3	Coef. Torque (KQs): <b>1,93195</b>
Comp. Linha D'água: (m)	42,50	Profundidade do eixo (m):	1,425	Coef. avanço (J): <b>5,5009</b>
Boca Moldada: (m)	7,50	Rotação:	100,0	Veloc. avanço (Va) [m/s]: <b>15,1274</b>
Calado Moldado na PV: (m)	2,250	Razão de Áreas Fa/F:	0,74	Torque do propulsor (Q) [KN.m]: <b>67,27</b>
Calado Moldado na PR: (m)	2,250	Razão passo diâmetro:	0,75	Diferença Forças Propulsivas: <b>-97,705</b>
Vol. Desloc. Moldado: (m3)	252,70	<b>RESULTADOS</b>		
LCB rel. à PR: (m)	18,00	<b>CASCO:</b>		
Área Transv. do Bulbo (m2):	0,00	Coef. Esteira (w):	0,15985	Eficiência propulsiva: <b>0,000973</b>
Altura Centro Área Bulbo: (m)	0,00	Coef. Red. Força Prop. (t):	0,18116	Potência por hélice (THP): <b>3.258,60</b>
Coef. Seção Mestra:	0,7000	Efic. Rot. Relativa ( $\eta_r$ ):	0,99862	Potência por eixo (PHP): <b>3.258.600,90</b>
Coef. Linha D'água:	0,7500	Potência Efetiva (EHP):	5191,6	Potência por motor (BHP): <b>3.296.052,98</b>
Área Transom: (m2)	10,00	Eficiência do casco:	0,97463	
Área Apêndices: (m2)	10,00	<b>MOTOR:</b>		
Parâmetro Forma de Popa:	-10	Margem de rotação (%): <b>5,00</b>		
Velocidade de serviço (nós)	35,00	Margem de mar (%): <b>15,0</b>		
Eficiência Mec.Transmissão:	0,990	Margem de motor (%): <b>10,0</b>		
Quantid. motores:	1	<b>PROPULSOR:</b>		Pot. Req. motor (MCR) [HP] <b>4169507,02</b>
Quantid. propulsores:	1	Rend. águas abertas ( $\eta_0$ ):	0,0010	Rotação do motor (rpm): <b>113,56</b>
		Força Propulsiva (KN):		
		Requerida:	262,6	
		Disponível:	164,9	
		Cavitação: <b>5 % dorso</b>	<b>nok</b>	

## ANEXO 1 - Cartão de manutenção do hidrojetado da lancha Pacific 24

<b>SERVICING INTERVALS (JET)</b>											
ITEM	WHAT TO DO	REFER TO	1ST 5 HRS.	1 DAY	30 HRS.	100 HRS.	500 HRS.	1 MTH	3 MTHS	1ST 2000 HRS.	5000 HRS.
<b>Intake Flow Path.</b>	Clear blockages	"8.5.1"/ 1		•							
<b>Thrust Bearing.</b>	Lubricate	"8.5.1"/ 2			•			•			
<b>Water Seal</b>	Check for leaks	"8.5.1"/ 4		•							
<b>Anodes</b>	Check condition	"8.5.1"/ 5							•		
<b>Steering System</b>	Check integrity	"8.5.1"/ 6		•	•						
<b>Steering Crank Cotter</b>	Check integrity and lubricate	"8.5.1"/ 6-4		•							
<b>Steering Cable</b> (If fitted)	Check integrity and lubricate	"8.5.1"/ 7		•					•		
<b>Steering Crank</b>	Check for wear in Crank Ball. Grease	"8.5.1"/ 8							•		
<b>Steering Shaft &amp; Bushes</b>	Check for wear Grease	"8.5.1"/ 9							•		
<b>Steering Shaft 'O' Ring</b>	Check for wear and leaking	"8.5.1"/ 10							•		
<b>Steering Cylinder &amp; Hoses</b> (If fitted)	Check for leaks and condition	"8.5.1"/ 11	•			•		•			
<b>Nozzle / Nozzle Housing</b>	Check Vertical End Float	"8.5.1"/ 12							•		
<b>Reverse Cylinder &amp; Hoses</b>	Check for leaks and condition	"8.5.1"/ 13	•					•			
<b>Reverse Cylinder Shaft</b>	Grease	"8.5.1"/ 14				•		•			
<b>Driveshaft Universal</b>	Lubricate	"8.5.1"/ 15	<b>As recommended by the Drive Shaft Manufacturer.</b>								
<b>Screen Rake &amp; Bearings</b>	Check integrity & lubricate	"8.5.1"/ 16							•		
<b>Complete Jet Unit</b>	Examine / Repair as required	"8.5.1"/ 17								•	•
<b>Steel Hull (Only)</b>	Carry out Insulation checks	"8.5.1"/ 17k						•			