

Avaliação Operacional de Sistemas Propulsivos: Possibilidades Futuras de Aplicação do Hidrojato nos Meios Navais da Marinha do Brasil

Igor Pinheiro de Araújo Costa^{1,2}, Sérgio Mitihiro do Nascimento Maêda¹, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira², Arthur Pinheiro de Araújo Costa³, Agenor Fabiano Pampolha Garcia³, Marcos Alexandre Pinto de Castro Junior⁴, Carlos Francisco Simões Gomes¹ e Marcos dos Santos⁵

¹Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói /RJ – Brasil

²Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), Rio de Janeiro/ RJ – Brasil

³Marinha do Brasil (MB), Rio de Janeiro/ RJ – Brasil

⁴Pontifícia Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro/ RJ – Brasil

⁵Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro/ RJ – Brasil

Resumo – Este artigo tem por objetivo verificar a viabilidade do emprego da propulsão por hidrojato em navios da Marinha do Brasil (MB), tendo em vista a limitação que a propulsão convencional apresenta principalmente em regiões de baixa profundidade e de difícil manobrabilidade, como regiões ribeirinhas e pantaneiras. Para isso, foi utilizada Pesquisa Operacional (PO), por meio do método Holtrop, para comparar as eficiências da propulsão a hidrojato e convencional, além de suas características energéticas e operacionais. Foram exemplificados alguns casos de aplicação de hidrojato em navios militares, avaliando a viabilidade de implementação desse tipo de propulsão em outros meios navais da MB. Os resultados mostram que a propulsão por hidrojato é mais eficiente que a convencional em determinadas situações e pode ser muito útil à MB, principalmente em operações ribeirinhas e pantaneiras, contribuindo para o aumento da capacidade de fiscalização nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB).

Palavras-Chave – Análise de eficiência, propulsão a hidrojato, aplicação militar.

I. INTRODUÇÃO

A MB tem como missão principal a garantia da soberania nacional nas AJB. Para isso, é necessário que os meios empregados sejam modernos, versáteis, robustos e eficientes. Identifica-se uma dificuldade do cumprimento dessa missão, principalmente em regiões ribeirinhas e pantaneiras, onde as pequenas profundidades e a 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 a quantidade de 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

Igor Pinheiro de Araújo Costa, igorpin89@gmail.com, Tel. +55-21-97184-2699, Sérgio Mitihiro do Nascimento Maêda, sergiomnmaeda@gmail.com, Tel. +55-21-98865-9501, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira, luiz.frederico@marinha.mil.br, Tel. +55-21-99983-1103, Arthur Pinheiro de Araújo Costa, thurcos91@gmail.com, Tel. +55-84-99601-1040, Agenor Fabiano Pampolha Garcia, agenorpampolha@hotmail.com, +55-84-98170-1711, Marcos Alexandre Pinto de Castro Junior, im.alexandre07@gmail.com, +55-21-98387-7312, Carlos Francisco Simões Gomes, cfs1@bol.com.br, Tel. +55-21-99614-7151, Marcos dos Santos, marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br, Tel. +55-21-99813-6603.

útil de melhorar as condições de operação das embarcações de fiscalização nessas regiões sensíveis, o que aumentaria consideravelmente a capacidade de cumprir suas missões.

Nos dias atuais, 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 difícil em que se encontra a economia brasileira e, conseqüentemente, a MB, 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 [1], 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.

Nesse contexto, a PO surge como excelente ferramenta para resolver o problema em lide.

O termo PO apareceu em 1939 durante a II Guerra Mundial, mas era pouco conhecida e nada estudada. A evolução da PO aconteceu mesmo após a Primeira Revolução Industrial, onde os primeiros problemas começaram a surgir [2].

As ferramentas fornecidas pela PO oferecem a mesma solução que um decisor poderia chegar por meio da intuição e que tais ferramentas podem ser abordadas por meio de modelos determinísticos de programação matemática [3].

O uso da PO justifica-se pelo fato de ela ser uma ciência composta por inúmeras técnicas e modelos intrinsecamente relacionados com a otimização de sistemas, podendo ser considerada uma ferramenta de otimização por excelência [4]. Após revisão da literatura, foi observado que a PO não é tão utilizada em aplicações voltadas à propulsão de navios militares, para atender às potencialidades de utilização na MB [5].

Em face ao exposto, este artigo tem por objetivo verificar a viabilidade de instalação da propulsão por hidrojato nas embarcações miúdas, de médio e de grande porte da MB, avaliando, por meio da PO, vantagens e desvantagens desse sistema em relação à propulsão convencional.

Na seção 2, é feita a descrição da propulsão por hidrojato, abordando suas principais características.

Na seção 3, é realizada uma análise comparativa entre propulsão convencional e por hidrojato, ressaltando os aspectos concernentes à eficiência em diferentes condições de operação e vantagens de um em relação ao outro.

Em seguida, na seção 4, é estudado o emprego da propulsão por hidrojato em meios navais de Marinhas estrangeiras e também em embarcações miúdas da MB, além de apresentação de dados relevantes a respeito do projeto de construção da Corveta Nacional.

Por fim, é feita uma análise comparativa da eficiência quasi-propulsiva de um propulsor convencional e um hidrojato, com a discussão sobre os resultados obtidos.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Hidrojato

O hidrojato é um dispositivo de propulsão marítima no qual a água é fornecida a uma bomba interna que adiciona energia ao fluido e a expete pela popa da embarcação em alta velocidade [6]. Esse tipo de propulsão é usado principalmente em pequenas embarcações de recreio de alta velocidade ou em situações em que uma alta manobrabilidade se faz necessária [7].

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 hidrojato.

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 hidrojato [7].

B. Descrição do sistema de propulsão por hidrojato

Uma instalação de hidrojato montado na popa pode ser dividida em quatro componentes: a entrada, a bomba, o bocal e o dispositivo de direção [8]. A Fig. 1 mostra um desenho de uma instalação típica de jato de água, com os principais componentes destacados. O principal componente é a bomba, que produz o jato na saída do bico. Em geral, o estator e o bocal estão integrados em um único componente. 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 Fig. 1 mostra um duto de entrada embutido, utilizado, por exemplo, em balsas rápidas e iates a motor de alta velocidade.

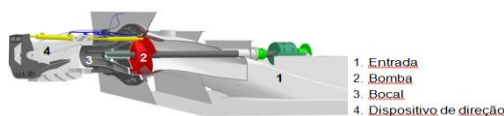


Fig. 1. Visão tridimensional de uma instalação de hidrojato [8].

Uma visão geral dos conceitos básicos dos sistemas de dutos de entrada de hidrojato é abordada por [9]. 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. Trata-se de um sistema de propulsão que elimina reversores, longos eixos, hélices e lemes.

C. Princípios físicos e termodinâmicos do hidrojato

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

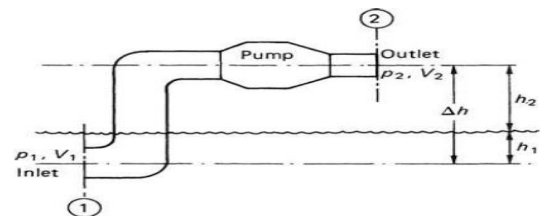


Fig. 2. Sistema de hidrojato idealizado [7].

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 pelo jato de água é então dado por (1) [10]:

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

Onde ρ é a densidade da água.

Assim, o aumento na taxa de variação de momento (Δ_M) da água que passa pelo do jato de água é dado por (2):

$$\Delta_M = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1) \quad (2)$$

Como a força é igual à taxa de variação de momento linear, o empuxo produzido pelo sistema é dado por (3):

$$T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1) \quad (3)$$

E a potência de propulsão (*propulsion power*) P_T é dada por (4):

$$P_T = TV_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1) \quad (4)$$

Onde V_S é a velocidade do navio.

A fim de derivar uma expressão útil para a potência necessária para acionar o sistema de jato de água é necessário recorrer à aplicação da 1ª lei da Termodinâmica em um volume de controle compreendido entre as estações 1 e 2 da Fig. 2 (onde a energia interna do fluido será dada pelos fatores de pressão, energia cinética e altura, bem como considerando as perdas e o processo como sendo adiabático). Por isso pode-se escrever para o sistema (5) [7]:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H_p = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h + h_{\text{perda}} \quad (5)$$

Onde: H_p é a parcela associada à altura de energia fornecida ao sistema pela bomba do hidrojato [7];

Δh a diferença entre a altura da entrada e saída do propulsor (ou seja, $\Delta h = h_1 + h_2$), também visto na Fig. 2;

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

No caso da diferença Δh 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 pelo sistema, que podem impedir o fluxo durante a sua passagem pela unidade.

Voltando agora para (5), para fins práticos e tendo em vista que as alturas envolvidas e seu efeito sobre a pressão ambiente são pequenas, pode-se assumir que a pressão estática é constante da entrada à saída do propulsor, portanto $p_1 \cong p_2$; além disso, as alturas de submersão são geralmente muito pequenas e podem ser consideradas desprezíveis, ou seja, $h_1 \cong 0$ [7]. Com isso, (5) pode ser reescrita como (6):

$$H_p = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_2 + h_{\text{perda}} \quad (6)$$

Agora a potência transferida para a água pela bomba pode ser expressa em termos de energia por unidade de tempo como $\dot{m}gH_p$, que, de (6) leva à expressão (7):

$$P_{\text{bomba}} = \dot{m} \left[\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{\text{perda}}) \right] \quad (7)$$

Assim, é possível calcular a eficiência em águas abertas equivalente do hidrojato, que pode ser definida a partir de (4) e (7), sendo a razão entre a potência de propulsão e a potência hidráulica da bomba, da seguinte forma (8) [7]:

$$\eta_0 = \frac{V_s(V_2 - V_1)}{\left[\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{\text{perda}}) \right]} \quad (8)$$

Por analogia com os hélices, a eficiência da bomba do hidrojato pode ser expresso como (9) [11]:

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\Phi \psi}{2\pi K_Q} \quad (9)$$

Onde ϕ e ψ são o Coeficiente de Vazão Volumétrica e Coeficiente de Energia, respectivamente, e definidos por (10) (11):

$$\Phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (10)$$

$$\psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (11)$$

K_Q é o coeficiente de torque normal do hélice convencional.

Como o valor de η_{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 [7]. 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 observada (8), juntamente com um coeficiente de casco apropriado abrangendo o efeito do jato de água [7].

Foi desenvolvido um modelo paramétrico para a descrição do comportamento do conjunto hidrojato-casco, que permite a identificação separada da interação entre os termos que interferem na relação mútua entre o jato de água e o casco do navio [12].

D. Aspectos de manobra do hidrojato

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 [7].

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

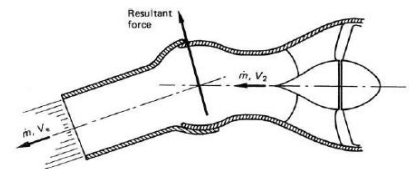


Fig. 3. Princípio da capacidade de manobra do hidrojato [7].

O ângulo mediante o 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 princípios de momentum.

O design do dispositivo reversor pode ser da forma simples, mostrada na Fig. 4 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 Fig. 4:



Fig. 4. Mecanismo do controle de empuxo do hidrojato.

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.

III. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE HIDROJATO E MOTOR DE POPA CONVENCIONAL

Os últimos avanços tecnológicos nos hidrojetos os colocaram à frente dos sistemas de hélices convencionais para muitos tipos aplicações marítimas de alta velocidade, incluindo navios militares, balsas e embarcações de recreio. Os hidrojetos modernos oferecem várias vantagens, como alta eficiência, aceleração rápida e uma excelente manobrabilidade [10].

Além das vantagens operacionais, os hidrojetos submersos oferecem um potencial para economia de peso e espaço no sistema de propulsão e podem ser considerados um fator-chave para a propulsão em plataformas menores [13]. Os benefícios em termos de layout geral e arranjo de maquinário poderiam permitir que usos alternativos do espaço fossem considerados, por exemplo, para implementação de sistemas portáteis a bordo, ou até para estações de lançamento e recolhimento de embarcações miúdas.

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

A. Segurança

Em contraste com o motor de popa convencional, a propulsão por hidrojato não é ameaçada por fragmentos sólidos flutuantes, como troncos, cordas ou redes de pesca. 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.

B. Manobrabilidade

A manobrabilidade é uma das características mais importantes dos navios [14]. Nesse contexto, o hidrojato mostra-se bastante relevante, pois, mesmo a uma baixa velocidade, proporciona 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 possibilita manobras de giro no próprio eixo em 360°, além de manobras de frente e reverso sem troncos e sem necessidade de total desaceleração.

C. Eficiência

Para analisar a eficiência dos propulsores, será realizada a análise da Fig. 5.

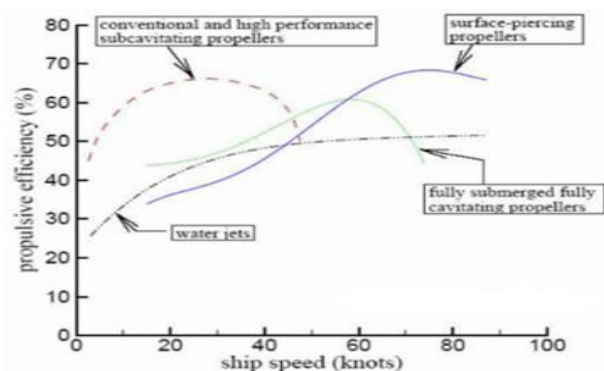


Fig. 5. Eficiência de propulsores em relação à velocidade do navio [1].

Analisando a Fig. 5, observa-se que, para velocidades de até 45 nós, os hélices convencionais apresentam maior eficiência que o hidrojato. Porém, verifica-se que a partir das 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 hidrojetos 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.

D. Ruído e cavitação

Em comparação com o motor de popa convencional, o hidrojato garante menor nível de ruído e vibração [15]. Esse fator é de extrema importância para embarcações militares, pois, quanto menos ruído for emitido, mais estes conseguem omitir sua assinatura acústica e, consequentemente, dificultar a detecção por sensores inimigos.

E. 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.

F. Emprego do hidrojato em Marinhas estrangeiras

O hidrojato vem sendo cada vez mais aplicado em navios militares de países desenvolvidos, como Estados Unidos, Coréia do Sul, Finlândia e Noruega. A propulsão por hidrojato oferece vantagens significativas em muitos navios de alta velocidade ou para fins especiais, como navios militares [16].

A título de exemplo de emprego dos hidrojatos nos navios militares mais modernos, cita-se o programa *Littoral Combatant Ship* (LCS) da Marinha dos EUA. São os maiores navios já construídos que empregam hidrojatos. Como exemplo, cita-se o USS *Freedom* (LCS- 1) e o USS *Independence* (LCS-2), que têm comprimento total de respectivamente 115 e 127 metros. Além do emprego em navios de médio e grande porte, destaca-se também a aplicação de propulsão por hidrojato em veículos de assalto anfíbios e submarinos de Marinhas estrangeiras.

G. Lancha Pacific 24

A PACIFIC 24 é uma lancha tipo casco semirrígido *waterjet* empregada na MB, 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.

H. Projeto de Corveta Brasileira

O emprego de hidrojatos compensa em termos de eficiência e consequentemente em termos financeiros a partir da operação do meio em velocidades predominantemente acima de 25 nós, quando comparado com a propulsão convencional [17]. Ressalta-se que, apesar de apresentar maior eficiência que a propulsão convencional a partir de 25 nós, o hidrojato apresenta a maior eficiência absoluta em velocidades acima de 45 nós.

A Fig. 6 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 pelo hidrojato.



Fig. 6. Eficiência de hidrojatos e propulsores convencionais [18].

Com o intuito de verificar a possibilidade de se obter uma propulsão economicamente mais viável para as novas Corvetas brasileiras em velocidades mais baixas, foi realizado um estudo sobre arranjos propulsivos mesclados, utilizando hélices e hidrojatos, por [18]. Assim, pode-se empregar os hélices para velocidades mais baixas e hidrojatos a velocidades mais altas.

Após os testes realizados por [18], chegou-se à conclusão de que dois motores MTU 16V 1163 M94 (um por eixo) forneceriam potência aos hélices. Já para atender à potência

requerida pelos hidrojatos, foi selecionada a turbina GE LM2500+G4.

IV. ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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 [7].

Holtrop propôs uma série de formulações matemáticas que foram obtidas mediante o uso de regressões baseadas em modelos aleatórios e dados em escala real no *Netherlands Ship Model Basin* [19].

Para a análise proposta, serão usados dados obtidos a partir do método Holtrop para o Navio-Patrolha Grajaú. O propulsor considerado como o mais eficiente mediante o uso do método Holtrop possui 2 pás, diâmetro de 1,65m, razão de áreas igual a 1,05 e os seguintes parâmetros (Tabela I):

TABELA I. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO PROPULSOR OPERANDO NAS TRÊS VELOCIDADES ANALISADAS.

V_s (nós)	V_a (m/s)	T (KN)	K_T	n (RPS)	RPM	J	P/D	η_0
12	5	60	0,49	4	240	0,7575	0,95	54
21	9	182,3	0,46	7,2	432	0,7575	0,95	49
35	15	262,6	0,34	10	600	0,9163	0,95	44

Serão comparados o propulsor convencional e o hidrojato operando em três faixas de velocidades: 12, 21 e 35 nós.

Para os cálculos a seguir, serão consideradas as seguintes premissas, baseadas em análises prévias dos sistemas por hidrojato [20]:

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 aproximação é uniforme (12):

$$V_a = (1 - w)V_s \quad (12)$$

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 [20].

h_j foi considerado igual a 0,06584, com base em [20];

A área do jato A_j foi considerado igual a 2,7449 m², obtida para um hidrojato operando para proporcionar um empuxo requerido para o NPA Grajaú demandar a velocidade de serviço (12 nós) (13)(14)(15).

$$H_D = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_{rr} \quad (13)$$

$$\mu = (1 - w) \frac{V_s}{V_j} \quad (14)$$

$$\eta_D = \frac{\eta_p \cdot \eta_r \cdot \left(\frac{1-t}{1-w} \right) \cdot 2\mu(1-\mu)}{1 + \psi - (1-\zeta)\mu^2 + \frac{2gh_j}{V_j^2} - \frac{C_p \cdot \mu^2}{(1-w)^2}} \quad (15)$$

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

TABELA II. RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA QUASI-PROPULSIVA.

V _s (nós)	Propulsão convencional		Hidrojato	
	η_0		$\eta_{jet} * \eta_{pump}$	
12	η_0	0,54	$\eta_{jet} * \eta_{pump}$	0,44
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,9761	η_H	0,97
	η_d	0,521	η_d	0,43
21	η_0	0,49	$\eta_{jet} * \eta_{pump}$	0,48
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,97	η_H	0,97
	η_d	0,47	η_d	0,48
35	η_0	0,44	$\eta_{jet} * \eta_{pump}$	0,53
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,97	η_H	0,97
	η_d	0,43	η_d	0,52

Avaliando os resultados da Tabela II, conclui-se que:

Para a velocidade de 12 nós, o propulsor convencional apresentou maior eficiência que o hidrojato;

Para a velocidade de 21 nós, os dois propulsores apresentaram eficiências muito próximas, com uma ligeira vantagem para o convencional (cerca de 1%);

Para a velocidade de 35 nós, o hidrojato mostrou-se muito mais eficiente que o convencional.

As conclusões obtidas corroboram com a Fig. 6, o que mostra que a análise proposta é confiável.

V. CONCLUSÃO

Torna-se evidente que o sistema de propulsão por hidrojato pode ser muito útil para os navios da MB, principalmente para operação em regiões com pequenas profundidades, com fragmentos sólidos flutuantes, como troncos, cordas ou redes de pesca 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.

Na 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. A instalação de hidrojato se justifica em embarcações que dispõem velocidades elevadas (em torno de 40 nós), principalmente embarcações miúdas, como lanchas orgânicas de navios maiores.

No que concerne ao 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.

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 artigo, foram abordados apenas os usos militares do hidrojetato, 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.

REFERÊNCIAS

- [1] J. L. Allison, "Propellers for high-performance craft," *Mar. Technol. SNAME News*, vol. 15, no. 04, pp. 335–380, 1978.
- [2] R. L. Ackoff and M. W. Sasieni, *Pesquisa operacional. Livros Técnicos e Científicos*, 1977.
- [3] C. R. Praia and C. F. S. Gomes, "Simulação computacional aplicada à modelagem do processo de recebimento de uniformes na marinha do Brasil," *X SEGeT*, 2013.
- [4] M. dos Santos, A. C. Paixão, and M. F. dos Reis, "Proposta de otimização do mix de produção utilizando o método simplex: um estudo de caso de uma confecção de moda íntima do município de Cordeiro – RJ. In: Anais do IV Simpósio de Engenharia de Produção: Lean Cost Management como filosofia global de otimi," *An. do IV Simpósio Eng. Produção*, 2016.
- [5] L. A. M. Pessôa, L. da Silva Teixeira, M. J. M. Guedes, E. R. Martins, and A. J. N. de Souza, "Pesquisa Operacional na Marinha do Brasil: o CASNAV, seu passado, presente e perspectivas," *Simpósio Bras. Pesqui. Operacional*, vol. 48, pp. 2302–2312, 2016.
- [6] D. J. Bricknell and A. Tate, "Considerations in the selection of propulsion systems for fast naval ships," *Int. Conf. Fast Sea Transp. Fast'2005*, 2005.
- [7] A. F. Molland and J. Carlton, "Marine propellers and propulsion," *Butterworth-Heinemann*, vol. 6, no. 1, pp. 79–82, 2012.
- [8] N. W. H. Bulten, "Numerical analysis of a waterjet propulsion system," *Dissertation Abstracts International*, vol. 68, no. 02, 2006.
- [9] C. Kruppa, "Wasserstrahltriebwerke f, r hochgeschwindigkeitsfahrzeuge," *Tech. Univ. t Berlin, 16e Jahrgang Jahrb. Schiffbau Tech. Gesellschaft, Band 62*, 1972.
- [10] A. Odetti, M. Altosole, G. Bruzzone, M. Caccia, and M. Viviani, "Design and construction of a modular pump-jet thruster for autonomous surface vehicle operations in extremely shallow water," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 7, p. 222, 2019.
- [11] K.-B. Kim, D.-J. Cho, and M.-K. Park, "A Study on the Performance of Waterjet Propulsion System for Small Naval Ship," *J. Soc. Nav. Archit. Korea*, vol. 47, no. 6, pp. 787–791, 2010.
- [12] T. J. C. van Terwisga, "A parametric propulsion prediction method for waterjet driven craft," in *MARIN, PO Box 28, 6700 AA Wageningen, Proceedings of the 4th International Conference on FAST'97, Abstract No. 151, Paper: P1997-15 Proceedings.*, 1997.
- [13] W. Giles, T. Dinham-Peren, S. Amaratunga, A. Vrijdag, and R. Partridge, "The advanced waterjet: propulsor performance and effect on ship design," in *IMarEST. 10th International Naval Engineering Conference and Exhibition. London: IMarEST, 2010*, pp. 1–19.
- [14] Z. Xu et al., "Maneuverability Simulations for Twin-Waterjet Propulsion Vessel," *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 24, no. 1, pp. 19–23, 2019.
- [15] L. L. Duarte, "Projeto conceitual de uma embarcação do tipo catamarã para transporte de passageiros na região de Manaus," *TCC (graduação) - Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina*, 2017.
- [16] R. G. Amos, G. Maples, and D. F. Dyer, "Thrust of an air-augmented waterjet," *J. Hydronautics*, vol. 7, no. 2, pp. 64–71, 1973.
- [17] L. Arcand and C. R. Comolli, "Optimization of waterjet propulsion for high-speed ships," *J. Hydronautics*, vol. 2, no. 1, pp. 2–8, 1968.
- [18] J. Júnior et al., "Projeto de concepção de uma corveta convencional e de uma corveta moderna," *Universidade de São Paulo (USP)*, 2016.
- [19] G. Von Montfort, "Seleção de sistema propulsivo em cascos de deslocamento: uso de formulações clássicas e resultados de medição," *TCC (Graduação) Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2014.
- [20] J. Allison, *Marine Waterjet Propulsion. SNAME*, 1993.