

Estudo da viabilidade de aplicação da propulsão por hidrojetos em navios da Marinha do Brasil: uma abordagem à luz do método SAPEVO-M

Agenor Fabiano Pampolha Garcia¹, Igor Pinheiro de Araújo Costa², Sérgio Mitihiro do Nascimento Maêda³, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira⁴, Carlos Francisco Simões Gomes⁵, Marcos dos Santos⁶, Arthur Pinheiro de Araújo Costa⁷ e José Victor de Pina Corriça⁸

²³⁴⁵Universidade Federal Fluminense (UFF) - Rua Passo da Pátria, 156 – 209, São Domingos, Niterói – RJ

²⁴Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) - Praça Barão de Ladário, s/nº, Ilha das Cobras, Rua da Ponte, Ed. 23, Centro, Rio de Janeiro – RJ

⁶Instituto Militar de Engenharia (IME) - Praça Gen. Tibúrcio, nº 80, Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro – RJ

¹⁷⁸Marinha do Brasil - Ilha de Mocanguê Grande, s/nº - Ponta D'Areia - Niterói - RJ

agenorpampolha@hotmail.com, igorpin89@gmail.com, costa_igor@id.uff.br, cfsgl@bol.com.br,
marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br, sergiomnmaeda@gmail.com, frederico.horacio@gmail.com,
thurcos91@gmail.com, jvctor97@gmail.com

RESUMO

Este artigo tem por objetivo verificar a viabilidade técnica do emprego da propulsão por hidrojetos em navios da Marinha do Brasil, tendo em vista a limitação que a propulsão convencional apresenta principalmente em regiões de baixa profundidade e de difícil manobrabilidade. Para isso, foram observadas as características técnicas e operacionais dos sistemas propulsivos e exemplificados alguns casos de aplicação do hidrojetos em embarcações militares. Foram definidos para a análise dos sistemas propulsivos em questão os critérios de: Segurança Operacional, Manobrabilidade, Eficiência, Nível de Ruído e Aterramento, avaliados por meio da ferramenta de auxílio multicritério à decisão SAPEVO-M, por quatro Oficiais militares que já exerceram a função de comando em navios da Marinha do Brasil. Os resultados mostraram que a propulsão por hidrojetos pode ser muito útil, principalmente em operações ribeirinhas e pantaneiras, contribuindo para o aumento da capacidade de fiscalização nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB).

PALAVRAS-CHAVES: SAPEVO-M, Hidrojetos, Marinha do Brasil.

Tópicos: D&SP – PO em Defesa e Segurança Pública; ADM Apoio à Decisão Multicritério.

ABSTRACT

This paper aims to verify the feasibility of using waterjet propulsion in ships of the Brazilian Navy. In view of the limitation that the conventional propeller presents mainly in shallow and regions where is difficult to maneuver, such as riverside and the wetlands. For this, the Operational Research, through the Holtrop method, was used to compare the propulsion efficiencies of a waterjet and conventional propulsion. Besides its energetic and operational characteristics. Some cases of application of waterjet on military ships have been exemplified, evaluated by the feasibility of implementing this type of propulsion in other ships of the Brazilian Navy. The results show that waterjet propulsion is more efficient than the

conventional one and can be very useful, mainly in riverside and wetland operations, contributing to increase the inspection capacity of Brazilian Navy.

KEYWORDS: SAPEVO-M, Hydrojet, Brazil's Navy.

Paper topics: D&SP - PO in Defense and Public Security; ADM Multicriteria Decision Support.

1. INTRODUÇÃO

A Marinha do Brasil (MB) tem como missão principal a garantia da soberania nacional nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (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 útil de melhorar as condições de operação das embarcações de fiscalização nessas regiões sensíveis, o que aumentaria sobremaneira a capacidade de cumprir suas missões.

Nos dias atuais, alguns tipos de propulsão mais avançados, como o hidrojet, 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 (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.

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

Segundo Ackoff (1977), o termo Pesquisa Operacional (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.

Praia e Gomes (2013) afirmam que 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.

De acordo com Santos *et al.* (2016), 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.

Pessoa *et al.* (2016) afirmam que a produção acadêmica nacional voltada para problemas militares, sobretudo os navais, não tem tido muita expressividade, ou divulgação, no campo da PO, para atender às potencialidades de utilização na MB.

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.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. HIDROJATO

Segundo Amos *et al.* (1973), 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 expela pela popa da embarcação em alta velocidade.

O conceito de propulsão por jato de água remonta a 1661 quando Toogood e Hays 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 de barco de trabalho onde uma alta manobrabilidade se faz necessária. (CARLTON, 2012).

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.

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 o rápido crescimento do hidrojato.

2.2. 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. 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.

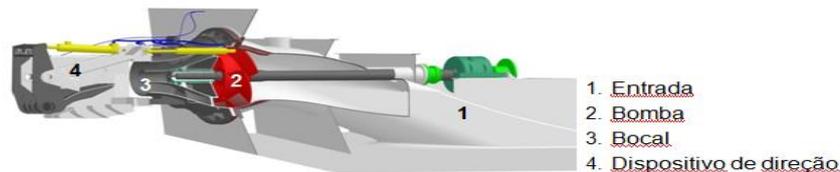


Figura 1: Visão tridimensional de uma instalação de hidrojato.

Fonte: Adaptado de BULTEN (2006)

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.

Trata-se de um sistema de propulsão que elimina reversores, longos eixos, hélices e lemes.

2.2.1. 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.

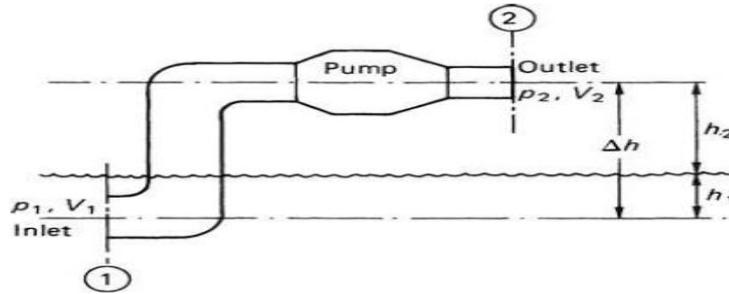


Figura 2: Sistema de hidrojato idealizado.

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 (ODETTI *et al.* 2019):

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

Onde ρ é a densidade da água.

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

$$\rho A_2 V_2 (V_2 - V_1); \quad (\text{Eq. 2})$$

Como a força é igual à taxa de mudança de momento, o empuxo produzido pelo sistema é dado por:

$$T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1); \quad (\text{Eq. 3})$$

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

$$P_T = T V_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1); \quad (\text{Eq. 4})$$

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:

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

Onde: H_p é a parcela associada à energia potencial fornecida ao sistema pela bomba do hidrojato;

Δh 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 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 através do sistema que podem impedir o fluxo durante a sua passagem pela unidade.

Voltando agora para a equação 5, para fins práticos, pode-se assumir que p_2 é constante acima da água linha, tendo em vista que as altitudes envolvidas e seu efeito sobre a pressão ambiente são pequenas. Com isso, a equação 5 pode ser reescrita como:

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

Agora a energia transferida para a água pela bomba pode ser expressa em termos de energia por unidade de tempo como $\dot{m}gH_P$, que, da equação 6 leva à expressão:

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

Assim, é possível calcular a eficiência em águas abertas equivalente do hidrojato, que pode ser definida a partir das equações 4 e 7, sendo a razão entre a potência de empuxo e a potência entregue, da seguinte forma:

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

Por analogia com os hélices, a eficiência da bomba do hidrojato pode ser expresso como (KIM *et al.*, 2010):

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

Onde ϕ e ψ são o fluxo, coeficientes de transferência de energia definidos por:

$$\Phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (Eq. 10) \quad \psi = \frac{gH}{N^2D^2} \quad (Eq. 11)$$

K_Q é o coeficiente de torque normal do hélice convencional.

Enquanto 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. 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 a equação 8, juntamente com um coeficiente de casco apropriado abrangendo o efeito do jato de água.

Van Terwisga (1997) desenvolveu 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.

2.2.2. 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 momentum do jato, como pode ser observado na figura 3:

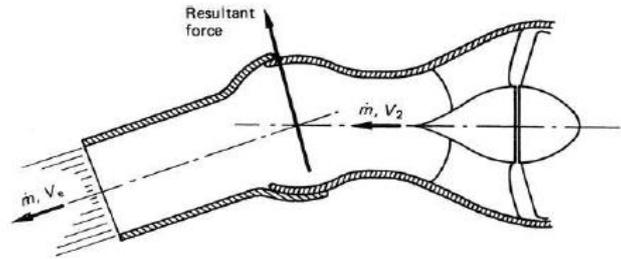


Figura 3: Princípio da capacidade de manobra do hidrojato.
Fonte: CARLTON (2012)

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 ± 30 .

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 Figura 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 figura 4:

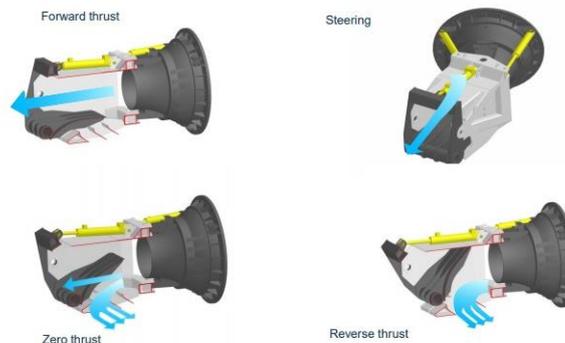


Figura 4: Mecanismo do controle de empuxo do hidrojato.
Fonte: WÄRTSILÄ (2020)

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.

3. 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 (ALTOSOLE, 2012).

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 (GILES, 2010). 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 embarcações miúdas.

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

3.1. 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.

3.2. MANOBRABILIDADE

Xu *et al.* (2019) afirmam que a manobrabilidade é uma das características mais importantes dos navios. 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 trancos e sem necessidade de total desaceleração.

3.3. EFICIÊNCIA

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

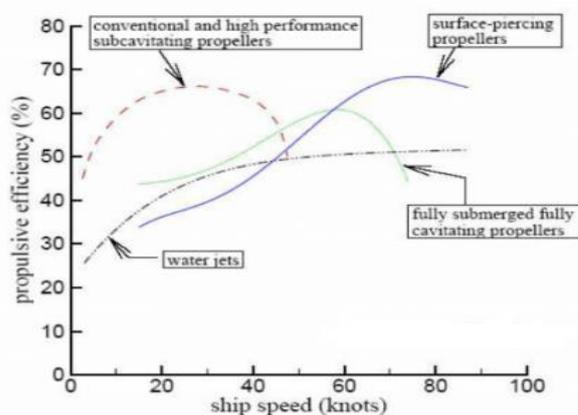


Figura 5: Eficiência de propulsores em relação à velocidade do navio.

Fonte: ALLISON (1978)

Analisando a figura 5, 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.

Observação: 1 nó significa uma milha por hora, aproximadamente 1852 metros por hora.

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 de superfície 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.

3.4. 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 menos ruído for emitido, mais estes conseguem omitir sua assinatura acústica e, conseqüentemente, dificultar a detecção por sensores inimigos.

3.5. 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.

3.6. EMPREGO DO HIDROJATO EM MARINHAS ESTRANGEIRAS

O hidrojato vem sendo cada vez mais aplicado em navios militares de países desenvolvidos, como Estados Unidos (Figura 6), Coreia 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 (ARCAND, 1968).

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. Temos como exemplo o USS Freedom (LCS-1) e o USS Independence (LCS-2), que têm comprimento total de respectivamente 115 e 127 metros.



Figura 6: *USS Freedom* (LCS 1).
Fonte: MILITARYFACTORY (2020)

Além do emprego em navios de médio e grande porte, destaca-se também a aplicação de propulsão por hidrojetos em veículos de assalto anfíbios e submarinos de Marinhas estrangeiras.

3.7. EMPREGO DO HIDROJATO NA MB

Nesta seção, aborda-se o emprego de hidrojetos em meios navais da MB, que estão entre os mais novos e modernos da frota brasileira.

3.7.1. LANCHAS PACIFIC 24

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

3.7.2. DGS 888 RAPTOR

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 hidrojetos AlamarinJet AJ340, e possibilita à embarcação alcançar velocidades superiores a 42 nós, além de apresentar redução de ruídos e vibrações.

3.7.3. PROJETO DE CORVETA BRASILEIRA

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.

A figura 7 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.

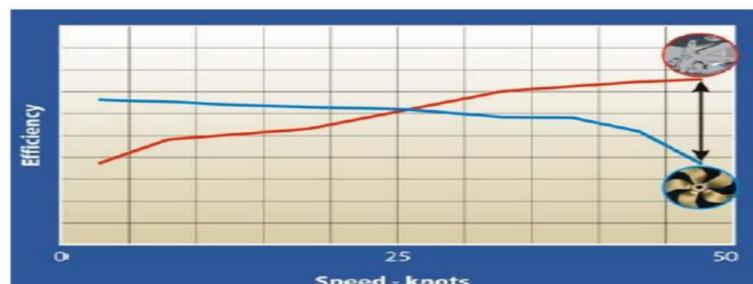


Figura 7: Eficiência de hidrojetos e propulsores convencionais.
Fonte: ALLISON (1993)

A fim de verificar a possibilidade de se obter uma propulsão economicamente mais viável para as novas Corvetas brasileiras em 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.

Após os testes realizados, Júnior *et al.* (2016), chegaram à conclusão de que dois 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.

4. ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Segundo Carlton (2012), 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 (1982) 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 (VON MONFORT, 2014).

Para a análise proposta, serão usados dados obtidos a partir do método Holtrop para o Navio-Patrolha Grajaú. O propulsor considerado 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 1):

Tabela 1: Parâmetros de operação do propulsor operando nas três velocidades analisadas.

Vs (nós)	Va (m/s)	T (N)	KT	n (RPS)	RPM	J	P/D	η_o (%)
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 (2020)

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:

- 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 ($V_a = (1 - w)V_S$);
- 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); e
- 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).

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

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

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

Após a aplicação dos cálculos, obtém-se a eficiência quasi-propulsiva para o hélice convencional e o hidrojato, conforme a tabela 2:

Tabela 2: Resultados dos cálculos de eficiência quase-propulsiva.

Vs [nós]	Propulsor Convencional		Hidrojato	
	η_0	η_{rr}	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	η_D
12	η_0	0,54	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,4483
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,97619	η_H	0,97619
	η_D	0,521871	η_D	0,437626
21	η_0	0,49	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,4801
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,97608	η_H	0,97608
	η_D	0,473496	η_D	0,468616
35	η_0	0,44	$\eta_{jet} \cdot \eta_{pump}$	0,537666
	η_{rr}	0,99	η_{rr}	1
	η_H	0,975958	η_H	0,975958
	η_D	0,425127	η_D	0,524739

Fonte: Própria (2020)

Avaliando os resultados da tabela 2, 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 Figura 7, o que mostra que a análise proposta é confiável.

5. CONCLUSÃO

Torna-se evidente que o sistema de propulsão por hidrojetos 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 hidrojetos seriam muito úteis para o cumprimento da missão da MB nessas áreas.

Na análise comparativa entre hidrojetos 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 hidrojetos se justifica em embarcações que dependem 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 hidrojetos 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 hidrojetos, 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.

Os trabalhos futuros poderiam abordar a utilização de softwares como o CFD para a determinação da pressão e da dedução do empuxo, tendo em vista que esses parâmetros são de extrema importância para a eficiência do hidrojetos.

6. REFERÊNCIAS

ACKOFF, Russell L.; SASIENI, Maurice W. Pesquisa Operacional. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1977.

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

ALLISON, J. Marine Waterjet Propulsion. SNAME. 1993.

ALTOSOLE, Marco et al. Dimensionless numerical approaches for the performance prediction of marine waterjet propulsion units. International Journal of Rotating Machinery, v. 2012, 2012.

AMOS, Robert G.; MAPLES, Glennon; DYER, David F. Thrust of an air-augmented waterjet. Journal of Hydronautics, v. 7, n. 2, p. 64-71, 1973.

ARCAND, L.; COMOLLI, C. R. Optimization of waterjet propulsion for high-speed ships. Journal of Hydronautics, v. 2, n. 1, p. 2-8, 1968.

BRICKNELL, David J; SKARDA, Robert - Power Growth in Naval Combatants, DTA Asia Feb. 2005

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

CARLTON, J. Marine propellers and propulsion. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2012.

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.

KIM, Kyoung-Bae; CHO, Dong-Joo; PARK, Myung-Ku. A Study on the Performance of Waterjet Propulsion System for Small Naval Ship. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, v. 47, n. 6, p. 787-791, 2010.

KRUPPA, C., Brandt, H., and Ostergaad, C., “Waterjet drives for high speed vehicles”, Jahrbuch der STG 62, pp. 228-258. 1968.

ODETTI, Angelo et al. Design and construction of a modular pump-jet thruster for autonomous surface vehicle operations in extremely shallow water. Journal of Marine Science and Engineering, v. 7, n. 7, p. 222, 2019.

PESSÔA, Leonardo Antonio Monteiro et al. PESQUISA OPERACIONAL NA MARINHA DO BRASIL: O CASNAV, SEU PASSADO, PRESENTE E PERSPECTIVAS. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, v. 48, 2016.

PRAIA, Carlos Ribeiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. Simulação computacional aplicada à modelagem do processo de recebimento de uniformes na marinha do Brasil. Resende. X SEGeT, 2013.

SANTOS, Marcos dos et al. 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 otimização em organizações. Recife (PE): FBV, 2016.

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 propulsão com uso de formulações clássicas. 2014.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä Modular Waterjets. 2020. Disponível em: <https://www.wartsila.com/marine/build/propulsors-and-gears/waterjets/wartsila-modular-waterjets>. Acesso em: 26 de maio de 2020.

XU, Zijing et al. Maneuverability Simulations for Twin-Waterjet Propulsion Vessel. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), v. 24, n. 1, p. 19-23, 2019.

