

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

PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DO HIDROJATO NA PROPULSÃO NAVAL

CT FELIPE PASETTO FUNEZ

CIAW  
Rio de Janeiro  
2020

CT FELIPE PASETTO FUNEZ

PRINCÍPIO E APLICAÇÕES DO HIDROJATO NA PROPULSÃO NAVAL

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

Orientadores:

Professor Alexandre Teixeira de Pinho Alho

CMG(RM1) Marcos Thadeu Nazareth Ramos

CIAW  
Rio de Janeiro  
2020

# FOLHA DE APROVAÇÃO

CT FELIPE PASETTO FUNEZ

PRINCÍPIO E APLICAÇÕES DO HIDROJATO NA PROPULSÃO NAVAL

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:

Alexandre Teixeira de Pinho Alho, D.Sc – UFRJ \_\_\_\_\_

Marcos Thadeu Nazareth Ramos, CMG (RM1) – CIAW \_\_\_\_\_

Carlos Alberto Órfão Martins, CC (RM1-EM), M.Sc – CIAW \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu avô Walter Pasetto, que nos deixou já há algum tempo, mas sempre estará nas minhas lembranças.

## PRINCÍPIO E APLICAÇÕES DO HIDROJATO NA PROPULSÃO NAVAL

### **Resumo**

Este trabalho abordará o princípio de funcionamento do sistema de propulsão a hidrojato, explicando o porquê desses modernos propulsores – desenvolvidos por grandes companhias como Hamilton, Wärtsilä e Kamewa – equiparem meios aquáticos de todos os portes. Esses propulsores são capazes de equipar não só pequenas lanchas e jet-skis, mas navios como o Taurus (MDV 3000 Classe Júpiter), que desloca 11374 t e alcança 42 nós, com uma velocidade de cruzeiro de 40 nós. Também será analisado brevemente um histórico da propulsão a hidrojato, a fim de que possamos apresentar uma série de interessantes possibilidades de aplicação desse tipo de propulsão em navios da Marinha do Brasil de acordo com suas características de operação.

**Palavras-chave:** Hidrojato. Marinha do Brasil. Navios de Guerra;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hidrojato simplificado.....	11
Figura 2 – Eolípila .....	12
Figura 3 – Esboço de Davison.....	14
Figura 4 – Bombas e seus fluxos .....	16
Figura 5 – Hidrojato, Eixo, Acoplamento e Motor .....	17
Figura 6 – Hidrojato Idealizado.....	24
Figura 7 – Navio classe Freedom .....	26
Figura 8 – Navio classe Independence .....	27
Figura 9 – Fragata classe Valour .....	27
Figura 10 – Corveta classe Visby .....	28
Figura 11 – Navio rápido de ataque da classe Hamina .....	28
Figura 12 – Navio de patrulha rápido da classe Skjold .....	29
Figura 13 – Návio rápido de ataque da classe Car Nicobar .....	29
Figura 14 – Navio rápido de ataque da classe PKX .....	30
Figura 15 – Vida útil dos componentes do sistema de Hidrojato .....	33

## LISTAS DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SIMBOLOS

USN	Marinha dos Estados Unidos da América
MB	Marinha do Brasil
V	Velocidade
kt	nós (milhas náuticas por hora)
kW	quiloWatts
p	Pressão
ton	Toneladas (1000kg)
$\dot{m}$	Vazão Mássica
$\rho$	Densidade
T	Empuxo
$h_{loss}$	Perda de Carga
$\Delta h$	Varição de Pressão Estática
A	Área
CFD	Fluidodinâmica Computacional

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>1.1 Apresentação do Problema</b> .....	9
<b>1.2 Metodologia</b> .....	9
<b>1.3 Justificativa e Relevância</b> .....	10
<b>1.4 Objetivos</b> .....	10
<b>1.4.1 Objetivo geral</b> .....	10
<b>1.4.2 Objetivos específicos</b> .....	10
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	11
<b>2.1 Histórico</b> .....	11
<b>2.2 Princípios de Construção/Instalação</b> .....	14
<b>2.3 Princípio de funcionamento</b> .....	17
<b>3. CARACTERÍSTICAS E ANÁLISE DA PROPULSÃO A HIDROJATO</b> ....	23
<b>4. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO A HIDROJATO EM NAVIOS DE GUERRA</b> .....	26
<b>5. EMPREGO DO HIDROJATO NA MARINHA DO BRASIL</b> .....	32
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	34
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	35
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR</b> .....	36



## **1. INTRODUÇÃO**

A popularidade da propulsão hidrojato cresceu nos últimos 50 anos. Uma série de inovações permitiu que o sistema atingisse valores de eficiência mais altos, sendo capaz de competir com a propulsão a hélice e até substituí-la de forma permanente em algumas ocasiões.

O meio militar sempre buscou desenvolver soluções para as suas necessidades, contudo, a história do hidrojato, conforme Yetman (2010) descreve em seu livro, mostra que, dessa vez, um caminho diferente foi tomado, uma vez que só depois de comprovado sua eficiência e suas qualidades, ele começou a ser instalado em meios militares.

Observar sua evolução, compreender seu funcionamento e apresentar possibilidades para empregos, nos dias de hoje e no futuro, são itens fundamentais para a criação de uma força capaz de fazer frente às possíveis ameaças.

### **1.1 Apresentação do Problema**

O problema apresentado nesta pesquisa discorre a respeito dos motivos pelos quais a Marinha do Brasil (MB) deve ou não empregar o sistema de propulsão a hidrojato nos meios navais.

### **1.2 Metodologia**

No Capítulo 2, será realizada uma revisão da literatura, de modo a contextualizar e conceituar termos e aspectos sobre o sistema de propulsão a hidrojato, abordando seu histórico, suas características de construção e sua instalação e seu princípio de funcionamento

O Capítulo 3 abordará as características da operação desse sistema de propulsão, aprofundando um pouco mais a questão.

No Capítulo 4, serão analisados alguns tipos de navios de diversas marinhas que utilizam o hidrojato em sua propulsão, oferecendo um panorama geral.

Por fim, o capítulo 5 abordará como a Marinha do Brasil, tendo em vista suas peculiaridades, poderá utilizar navios propelidos por hidrojato.

### **1.3 Justificativa e Relevância**

A análise da utilização do sistema de propulsão a hidrojato é relevante, uma vez que colabora para a ampliação do conhecimento naval na área de propulsores hidrojato; aumenta o poder de dissuasão da MB com meios que ofereçam grandes velocidades e apresenta outras possibilidades de emprego do hidrojato na MB.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo geral**

Como objetivo geral, este trabalho busca explicar o funcionamento do sistema de propulsão hidrojato e apresentar possibilidades futuras de sua utilização na MB.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Dentre os objetivos específicos, este trabalho busca apresentar a evolução da propulsão naval com foco no hidrojato; descrever as características hidrodinâmicas do propulsor hidrojato; apresentar diferentes possibilidades de emprego desse sistema de propulsão e relacionar suas vantagens e suas desvantagens, apresentando, dessa forma, seu melhor emprego na MB.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O sistema de propulsão a hidrojato é composto por três componentes indispensáveis: o duto de admissão (*inlet duct*), a bomba (*pump*) e o bocal (*nozzle*), ilustrados pela figura abaixo. Nos hidrojetos com capacidade de direcionamento do jato, encontra-se, após o bocal, a concha (*bucket*), que, conforme sua posição, permite guinar o navio ou mesmo se deslocar a ré.

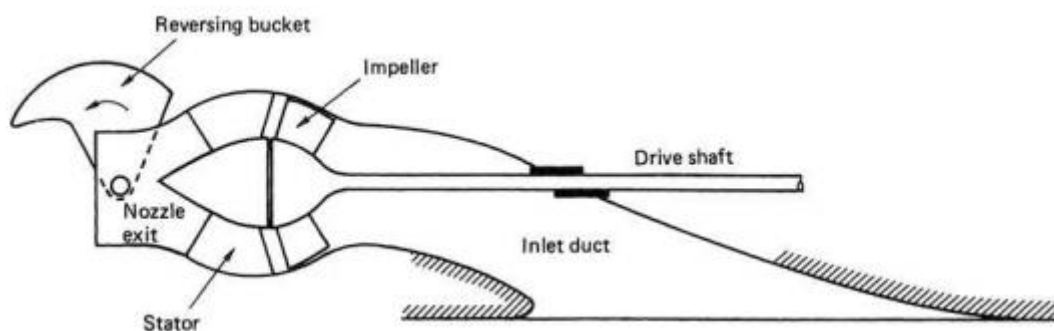


Figura 1 –Hidrojato Simplificado. Fonte: Carlton (2007).

### 2.1. Histórico

Entre 100 a.C. e 100 d.C., presume-se que o matemático e mecânico grego Heron de Alexandria tenha inventado a Eolípila. Trata-se de um dispositivo em forma de esfera com dois tubos, com formato semelhante à de um joelho, que são fixados diametralmente opostos na superfície. Quando são preenchidos com água e aquecidos, expulsavam vapor e produziam torque, girando o dispositivo, como ilustrado a seguir. Assim, nascia o primeiro motor a reação. Na época, tal dispositivo não foi levado a contínuos estudos e, por muito tempo, seu princípio de funcionamento permaneceu esquecido.



Figura 2 – Eolípila. Fonte: <http://ocortex.blogspot.com/2013/09/heron-de-alexandria.html>.

Em 1687, o físico e matemático inglês Isaac Newton publicou o enunciado do que, hoje, conhecemos como a terceira lei de Newton:

A terceira lei de Newton estabelece:

**Sempre que um objeto exerce uma força sobre outro objeto, este exerce uma força igual e oposta sobre o primeiro.**

Chamaremos uma dessas forças de *força de ação*, e a outra, de *reação*. Assim, podemos expressar a terceira lei de Newton na forma:

**Para cada ação existe sempre uma reação de mesmo módulo e de orientação oposta.** (HEWITT, 2015, p. 76)

O matemático suíço Daniel Bernoulli publicou, em 1738, um trabalho chamado *Hydrodynamica*, a respeito da mecânica dos fluidos. Foi cogitado, nesse trabalho, a ideia de um navio sendo impulsionado por um fluido pressurizado, mas ela nunca foi levada adiante. No entanto, as teorias de Bernoulli tiveram grande impacto no meio científico da época. Provavelmente, em uma de suas passagens pela Europa, o político norte-americano Benjamin Franklin tomou conhecimento acerca das teorias de Bernoulli. Ao retornar para

a América, ele desenvolveu essa ideia da propulsão a jato, descrevendo-a em sua obra *Maritime Observations*.

As palavras de Bernoulli também chegaram ao estado da Virgínia, nos Estados Unidos da América, no final do século XVIII, onde James Rumsey, engenheiro mecânico norte-americano, obteve apoio do então presidente do país, George Washington, e, posteriormente, de Franklin.

Bernoulli desenvolveu o primeiro navio com um sistema de propulsão a jato, sistema bastante rudimentar comparado com os hidrojetos existentes hoje, uma vez que descarregava pulsos de jato e, como todo o sistema era posicionado na parte da frente do navio, perdia muita eficiência antes de descarregar o fluxo no meio. Seus experimentos chegaram a alcançar 4 nós contra a corrente. Com a morte do inventor, o modelo foi, aos poucos, esquecido.

Sabe-se que a propulsão a hidrojato só alcançaria o potencial necessário para competir com outros modos de propulsão com bombas centrífugas de alto desempenho e motores rotativos de alta velocidade. Um século depois de Rumsey, a Royal Navy fez uma tentativa com o HMS *Waterwitch*, no entanto, ainda sem a tecnologia adequada, não foram apresentados os resultados esperados e o projeto foi abandonado.

O modelo atual de hidrojato é reflexo do trabalho bem-sucedido de Bill Hamilton, engenheiro neozelandês, cujo objetivo era usar pequenas embarcações para subir os rios estreitos, rasos e rápidos da Ilha Sul da Nova Zelândia.

Em 1954, Hamilton surpreendeu todos alcançando 20 MPH, em um rio com cerca de 6 polegadas de profundidade. Seus modelos mais antigos utilizavam uma bomba centrífuga, todavia, em 1956, com a ajuda do engenheiro George Davison, eles rascunharam uma bomba de fluxo axial para substituir a centrífuga. Além de reposicionarem o bocal para a altura do transom e reposicionarem a bomba, eliminando a necessidade de engrenagens para redirecionar o torque do motor. Esses foram os passos finais para o sucesso dos sistemas de propulsão a hidrojato modernos.

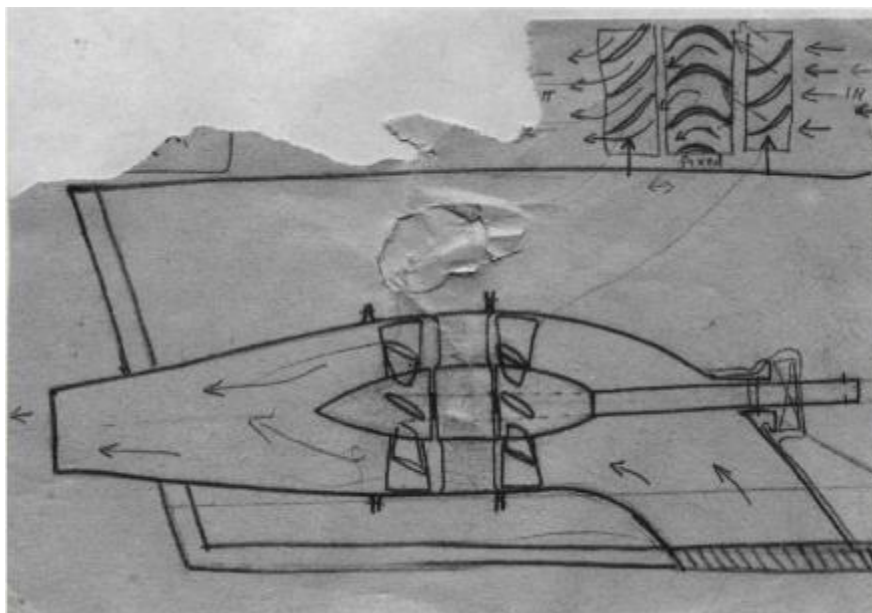


Figura 3 – Esboço de Davison. Fonte: Yetman (2010)

Décadas após tais inovações, cada componente foi aperfeiçoado, conforme aponta Carlton (2007). As bombas já ultrapassam a taxa de 90% de eficiência e, assim, o sistema de propulsão a hidrojato vem se popularizando em navios de diversos portes, para fins distintos.

## 2.2. Princípios de Construção/Instalação

O hidrojato é composto por diversos componentes e subsistemas dos quais este trabalho destacará a admissão, a bomba e o bocal, brevemente destacados na introdução. Para o funcionamento correto e seguro desse sistema de propulsão, todo o conjunto deve estar em perfeitas condições. Todos os componentes que entram em contato com o fluido são projetados a partir do software de CFD, principalmente devido à complexidade dos desenhos e às dificuldades evidentes em simular as condições de funcionamento sem gastos elevados.

Conforme as figuras a seguir ilustram, o jato de água, normalmente, é entregue pelos fabricantes das duas seguintes formas:

- i) Modular: uma única estrutura da admissão ao bocal é entregue ao estaleiro que está construindo o navio – os hidrojetos de menor potência são, majoritariamente, configurados dessa forma. Sua grande vantagem é a rápida instalação;
- ii) Personalizada: o sistema é dividido em dois módulos – com a admissão, a grelha e o duto; já o outro, com a bomba e o bocal. Assim, é possível um nível de adaptação maior aos diferentes formatos de cascos, melhorando as características estruturais do casco. Outra vantagem importante dessa configuração é a opção da utilização de diferentes materiais para a construção da admissão e do duto, como, por exemplo, o aço, o alumínio e o compósito (*composite*), que acompanham o material do qual o casco é constituído.

A admissão e o duto são desenhados de modo a reduzir ao máximo as perdas e garantir a alta eficiência da instalação. Encontra-se, no duto, a janela de inspeção, que permite retirar qualquer DOE, assim como permite a realização de inspeções na grelha e no impelidor.

O eixo também passa através do duto de admissão. Ele está posicionado entre o motor e o impelidor, que, respectivamente, são comumente constituídos pelos seguintes equipamentos: o acoplamento, o mancal de escora e o selo do eixo.

O acoplamento tem a função de permitir a partida do motor sem acionar a bomba, além de, em casos de emergência, desacoplar ambos de forma rápida. O mancal de escora tem a função principal de transferir ao casco a diferença entre o empuxo produzido pelo hidrojato e a resistência total do navio. O selo do eixo tem a função de impedir a entrada de água no interior do navio, por meio da pressão positiva de água. Em relação a isso, alguns fabricantes entregam sistemas de selamento inflável em caso de falha do selo.

A bomba é dividida em duas partes: o impelidor, montado na extremidade do eixo, e o estator, fixado à carcaça. O impelidor produz o empuxo que acelera o navio. Conforme Borett e Rae (2008) apontam, os hidrojetos mais modernos empregam dois tipos principais de bombas, de acordo com o fabricante: as de fluxo axial e as de fluxo misto. Os autores explicam que, sob condições uniformes de fluxo, a eficiência das bombas axiais pode ser semelhante à eficiência das mistas. Ao comparar bombas que tenham o mesmo tamanho de bocal e que estejam operando com a mesma rotação e com o mesmo SHP, a axial apresenta 5 a 6 nós a menos de limite de velocidade para a operação

continuada, sem cavitação. No entanto, ela apresenta um aumento de 20% no empuxo estático máximo, em relação ao modelo de fluxo misto, o que aumenta a versatilidade em navios com múltiplos modos de operação. Além disso, as bombas de fluxo misto têm um diâmetro, aproximadamente, 20% maior do que as de fluxo axial.

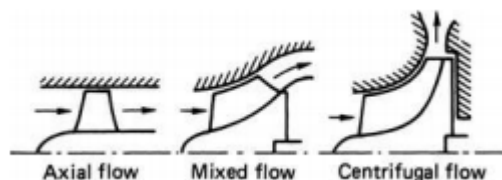


Figura 4 – Bombas e seus fluxos. Fonte: Carlton (2007)

Já o estator tem a função principal de alinhar o fluxo após a passagem pelo impelidor, aumentando a eficiência total do sistema. Acoplado ao estator está o bocal, que, gradualmente, reduz a área do duto de descarga até a área final. Essa redução da área disponível para a passagem do fluxo faz com que o fluido acelere ainda mais, aumentando também a eficiência do hidrojato.

Os hidrojetos do tipo *steerable* possuem uma concha reversora instalada, que permite redirecionar o jato para diferentes direções, o que proporciona um controle preciso sobre o navio, tanto em altas quanto em baixas velocidades. A concha, quando totalmente arriada, permite a manobra de *Crash Stop* – em ocorre o redirecionamento total do fluxo para a vante, parando o navio rapidamente.

Nos sistemas de maior potência, a concha possui somente a função de reversão do fluxo; já o bocal é capaz de se movimentar lateralmente, cumprindo a função que o leme executaria em um navio de propulsão convencional.

O sistema hidráulico de acionamento é simples e robusto, além de bastante similar aos utilizados no acionamento do leme em um navio com propulsão a hélice. Dele, saem todos os comandos necessários ao passageiro para manobrar o navio.



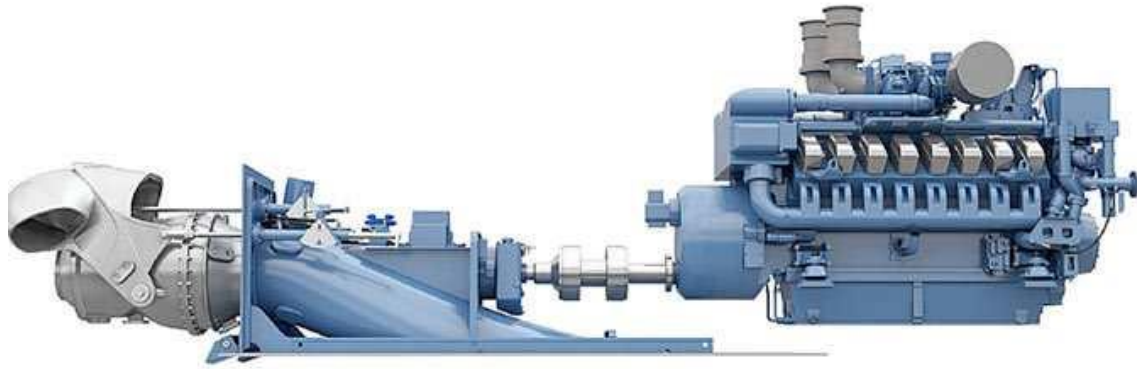


Figura 5 – Hidrojato, eixo, acoplamento e motor. Fonte: Wärtsilä

### 2.3 Princípio de Funcionamento

Conforme Carlton (2007) afirma, baseado no diagrama abaixo, vamos supor que a água entre no sistema com velocidade  $V_1$  e saia do sistema com velocidade  $V_2$ , através de um bocal de área  $A_2$ . A vazão mássica de água através do hidrojato é dado por  $\dot{m} = \rho A_2 V_2$ . Sendo  $\rho$  a densidade da água.

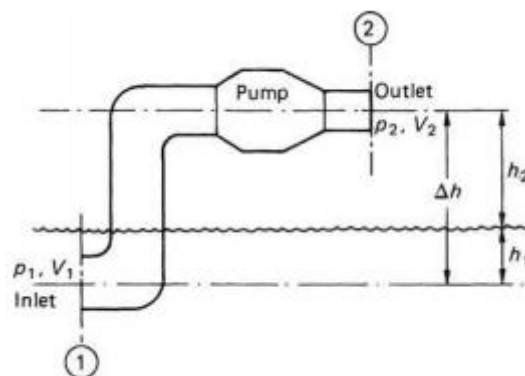


Figura – Hidrojato Idealizado. Fonte: Carlton (2007)

Portanto, o aumento da taxa de variação da água através do hidrojato é dado por  $\rho A_2 V_2 (V_2 - V_1)$ . Como a força é igual à variação do momento, o empuxo produzido pelo sistema é  $T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1)$  e o poder propulsivo é dado por:

$$P_T = TV_s = mV_s(V_2 - V_1) \quad (1)$$

Para obter uma expressão adequada da potência necessária para alimentar o hidrojato, é necessário utilizar a equação geral da energia mecânica dos fluidos e aplicá-la entre a admissão e descarga.

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

No caso da diferença de pressão estática entre a admissão e a descarga do hidrojato, a variável a ser observada é a existente entre o acionamento e a condição de funcionamento em viagem – especialmente importante em navios propelidos por hidrojetos, como representado na figura X, na condição de cruzeiro.

Em relação às perdas de pressão,  $h_{loss}$ , elas são associadas à fricção e à liberação de turbulência no escoamento, ao longo das curvas da tubulação. Além das obstruções causadas pela grelha e por diversas outras partes que podem atrapalhar a passagem do fluxo de água pelo hidrojato.

Voltando agora à equação (2) e, por razões práticas, assumindo que  $p_2$  é constante acima da linha da água (pressão atmosférica), uma vez que as altitudes envolvidas e seus efeitos na pressão ambiente são desprezíveis, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$H_p = \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + h_2 + h_{loss}, \text{ desde que } p_1 = p_2 + h_1 \rho g. \quad (3)$$

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 acordo com a equação (3), leva à expressão:

$$P_{pump} = \dot{m} \left[ \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss}) \right] \quad (4)$$

Portanto, a eficiência em águas abertas equivalente a uma unidade de jato de água pode ser definida pelas equações (1) e (4), como a razão entre a potência de empuxo e a potência fornecida pela seguinte forma:

$$\eta_0 = V_s (V_2 - V_1) + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss}) \quad (5)$$

O termo de perda  $h_{loss}$  na equação (5) é a soma de duas perdas independentes – aquelas definidas como perdas internas  $h_D$  e aquelas relacionados à perda de carga  $h_P$ . Logo,  $h_{loss}$  pode ser escrito da seguinte maneira:

$$h_{loss} = h_D + h_P \quad (6)$$

As perdas internas dependem principalmente da configuração do hidrojato, além disso, compreendem as perdas de admissão  $h_{DI}$ , as perdas de carga do difusor  $h_{DD}$  e as perdas de atrito  $h_{DSF}$ .

Portanto,

$$h_D = h_{DI} + h_{DD} + h_{DSF} \quad (7)$$

As perdas na admissão são, em si, a soma das perdas resultantes da grelha, das palhetas-guia e das curvas. Todas essas perdas são, principalmente, uma função da velocidade de admissão  $V_1$  e, conseqüentemente, podem ser expressas na seguinte forma:

$$h_{DI} = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (8)$$

O coeficiente  $k$  é a soma dos dois outros fatores  $k_1$  e  $k_2$ , que representam as perdas devido à grelha, as aletas direcionadoras e as perdas devido às curvas, respectivamente. Normalmente, os valores para  $k_1$  e  $k_2$  são 0,10 e 0,015, respectivamente. A perda de carga no difusor pode ser estimada a partir de métodos hidráulicos normais, a partir dos quais uma expressão para  $h_{DD}$  pode ser obtida,

$$h_{DD} = (1 - \eta_D)(1 - \varepsilon^2) \frac{V_1^2}{2g} \quad (9)$$

em que  $\eta_D$  é a eficiência do difusor da ordem de 90%, em circunstâncias normais, e  $\varepsilon$  é a razão entre as áreas de entrada e a saída do difusor.

O termo final da equação (7),  $h_{DSF}$ , que define as perdas por atrito nas superfícies, pode ser estimado a partir do cálculo das áreas molhadas de todos os acessórios ao longo do hidrojetato, com seus respectivos coeficientes de atrito.

A soma das perdas internas  $h_D$ , conforme definido na equação (7), é representada em termos de um único coeficiente de perda da seguinte forma:

$$h_D = k_D \frac{(V_s + \Delta V)^2}{2g} \quad (10)$$

Onde  $\Delta V = (V_2 - V_1)$ , de acordo com Van Walree, o valor de  $k_D$  normalmente estaria entre  $0.04 < k_D < 0.10$ . O termo referente à perda de carga  $h_p$  na equação (6) está

relacionado unicamente com a bomba e suas perdas associadas. Essa perda de pressão pode ser expressa em termos de pressão da bomba  $H$  e sua eficiência  $\eta_P$ , como  $h_P = H \frac{(1-\eta_P)}{\eta_P}$ . Para uma bomba moderna de ótimo design de fluxo misto ou axial o valor de  $\eta_P$  deve ser na ordem de 0.90.

Por analogia com os hélices a eficiência da bomba pode ser expressa como:

$$\eta_P = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\psi}{K_Q} \quad (11)$$

Onde  $\varphi$  é o fluxo e  $\psi$  é o coeficiente de transferência de energia, eles são definidos por:

$$\varphi = \frac{Q}{ND^3} \quad \psi = \frac{gH}{N^2D^2}, \text{ e } K_Q \text{ é o coeficiente de torque do propulsor.} \quad (12)$$

Embora o valor de  $\eta_P$  seja evidentemente mais alto para um jato de água do que para uma hélice, essa não é a base sobre a qual a comparação deve ser feita. Uma comparação adequada só pode ser feita em termos dos coeficientes quasi-propulsivos correspondentes que, para a hélice, incluem o casco e a eficiência rotativa relativa e, para a equação do jato de água (5), juntamente com o coeficiente apropriado do casco que envolve o efeito do jato de água.

Em um sistema de propulsão a jato de água, o casco e o jato de água interferem mutuamente. A resistência do casco nu é modificada devido a uma distorção do fluxo sobre o corpo posterior do navio, que, em altas velocidades, também pode introduzir uma alteração no ajuste, influenciando ainda mais nas características de resistência. Da mesma forma, o desempenho do hidrojato é alterado pelas distorções no fluxo do casco, uma vez que a camada limite da embarcação é ingerida no sistema de admissão de jato de água, portanto, difere das suposições normais de fluxo livre da teoria de jato de água. Para auxiliar na resolução desse problema, um modelo paramétrico para a descrição do comportamento geral de potência de uma configuração de hidrojato e do casco foi

desenvolvido por van Terwisga, que permite a identificação separada dos termos de interação.

### 3. CARACTERÍSTICAS E ANÁLISE DA PROPULSÃO A HIDROJATO

Ao optar pela utilização do hidrojato como sistema de propulsão de um determinado navio, como em qualquer outro projeto, deve ser feita a adequação do casco para a instalação do módulo, ainda na fase do projeto. Hoje, com os recursos da fluidodinâmica computacional, todo esse processo é mais fácil, uma vez que anos de experiência, tanto de estaleiros quanto dos fabricantes de hidrojato, permitiram montar modelos consideravelmente precisos. A relação entre fabricantes de hidrojetos e estaleiros deve ser muito próxima, ao longo do projeto, para evitar falhas que podem aumentar consideravelmente o custo inicial, que já é elevado. Pelos encartes e pelos manuais dos fabricantes, disponibilizados na internet, fica bastante evidente a importância dessa fase.

Com o navio pronto para operar, pode-se dividir a análise da operação dos navios com hidrojato em duas partes: baixa velocidade e alta velocidade. Como foi citado anteriormente, o emprego do navio deve ser observado para a escolha do tipo de hidrojato que será instalado a bordo. Dependendo das características específicas do navio, a escolha pode variar entre a bomba de fluxo axial e a de fluxo misto. Navios que precisam de alta manobrabilidade em baixa velocidade utilizarão unidades de fluxo axial; já os que precisam de um melhor desempenho em alta velocidade, é indicada a utilização de uma bomba de fluxo misto.

A respeito do navio como um todo, verifica-se a inexistência de diversos elementos anexos ao casco, como, por exemplo, os lemes, os pés de galinha, os eixos e as hélices. A ausência desses itens traz uma série de benefícios diretos e indiretos ao desempenho e à operação do navio. Seguem alguns exemplos:

- i) Um menor arrasto de perfil e de interferência, o que favorece um melhor desempenho;
- ii) A ausência das hélices permite operações em locais com profundidade muito menor e elimina a cavitação, a vibração e o ruído associados a esse tipo de equipamento. Dessa forma, há uma redução considerável da assinatura acústica do navio;
- iii) Devido às diferenças evidentes de assinatura acústica entre um navio com hélice – o qual os operadores de sonar estão acostumados a identificar – e

um com hidrojato, além de poucas técnicas eficazes, sua detecção por submarinos é mais difícil e sua classificação depende de confirmação visual;

- iv) Elimina esforços sobre acoplamentos e motores em mudanças de direção e, em aumento de torque, o motor funciona em regime estacionário, caso o hidrojato for equipado com concha.

Conforme Borrett e Era (2008) apontam, esse tipo de propulsão, até hoje, teve um foco maior, devido à sua eficiência em altas velocidades. Contudo, devido à demanda do mercado, ele está sendo cada vez mais utilizado em navios com diversos perfis de utilização. Tal fato também pode ser observado nas marinhas ao redor do mundo.

Carlton (2007) comenta que a alta capacidade de manobra em baixa velocidade e sua precisão ocorrem devido à rápida variação do *momentum* do jato de água, assim como devido à deflexão lateral do fluxo, que varia até  $30^\circ$  para cada bordo, o que permite ao operador uma resposta muito mais rápida do que a de um sistema propulsivo com hélice.

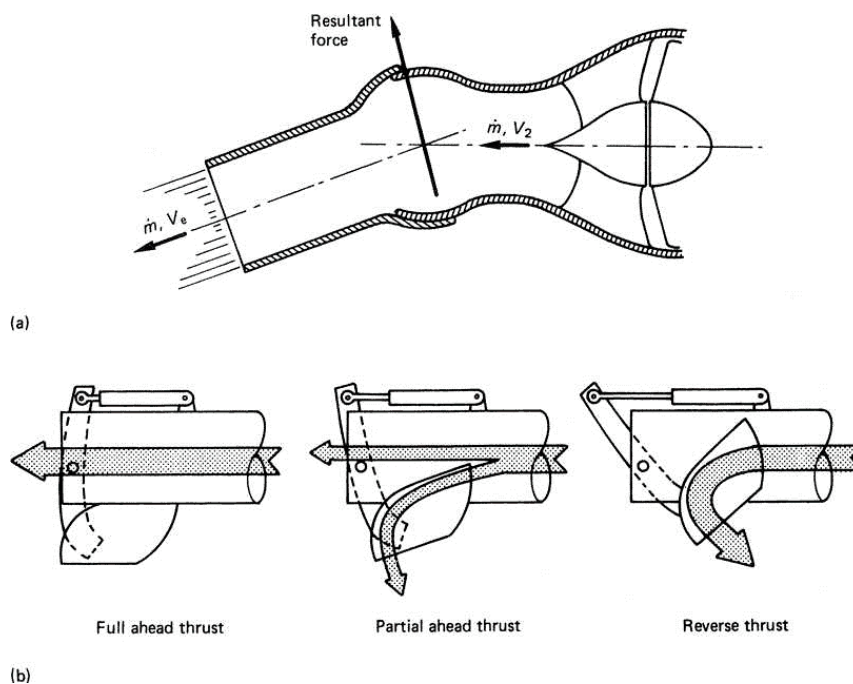


Figura 6 – Manobrando com o Hidrojato. Fonte: Carlton (2007)

Diversos autores deixam elucidado que, acima de 30 nós, o hidrojato é a escolha certa quando se fala sobre eficiência do navio em relação ao consumo de combustível.



Entre 25 a 30 nós, há uma zona de incerteza, onde muitos fatores podem mudar a resposta. Abaixo de 25 nós, a resposta costuma ser sempre a utilização da hélice.

Os fabricantes buscam continuamente apresentar melhorias nos seus produtos e, observando os avanços nesse aspecto nas últimas quatro décadas, não só a eficiência aumentou consideravelmente como o porte dos módulos estão cada vez maiores. Os fabricantes já oferecem hidrojetos com até 36 MW de potência, que costumam ser acionados por turbinas a gás.

Alguns fatores que afetam de forma negativa a performance do sistema de propulsão hidrojetado são:

- i) Variações no fluxo nas áreas adjacentes à admissão;
- ii) Entupimento parcial ou total da admissão;
- iii) Perdas na admissão, nos dutos, no impelidor e em outros componentes por diversos fatores;
- iv) Mudanças acentuadas de trim;
- v) Redução da razão de velocidade ( $\frac{V_2}{V_1}$ );
- vi) O efeito solo, na navegação em áreas com baixa profundidade, pode afetar vários dos itens apontados acima;
- vii) Quando o deslocamento do navio aumenta, age de forma diretamente proporcional na resistência ao avanço, reduzindo de forma considerável a velocidade final.

#### 4. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO A HIDROJATO EM NAVIOS DE GUERRA

Muitas das características citadas no último capítulo são extremamente importantes para os navios de guerra, desde navios-patrolha, embarcações de desembarque de tropa e veículos até navios de assalto anfíbio. Há diversos exemplos de navios de marinhas estrangeiras que utilizam propulsão a hidrojato, como, por exemplo:

- i) Navios de Combate Litorâneo (LCS), classe Freedom e Independence da Marinha dos Estados Unidos da América;



Figura 7 – Navio classe Freedom. Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Freedom-class\\_littoral\\_combat\\_ship](https://en.wikipedia.org/wiki/Freedom-class_littoral_combat_ship)



Figura 8 – Navio classe Independence. Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/USS\\_Independence\\_\(LCS-2\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/USS_Independence_(LCS-2))

ii) Fragatas, classe Valour, da Marinha da África do Sul;



Figura 9 – Fragata classe Valour. Fonte: <https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2015/11/26/valour-class-frigate-south-african-navy/>



iii) Corvetas, classe Visby da Marinha Real Sueca;



Figura 10 – Corveta classe Visby. Fonte: <https://www.wired.com/2009/02/sweden-build-wo/>

iv) Navios rápidos de ataque, classe Hamina da Marinha Finlandesa;



Figura 11 – Navio rápido de ataque da classe Hamina. Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hamina-class\\_missile\\_boat](https://en.wikipedia.org/wiki/Hamina-class_missile_boat)

- v) Navios de patrulha rápido, classe Skjold, Marinha Real Norueguesa;



Figura 12 – Navio de patrulha rápido da classe Skjold. Fonte: <http://i.imgur.com/GLcRfb7.jpg>

- vi) Navios rápidos de ataque, classe Car Nicobar da Marinha Indiana;



Figura 13 – Navio rápido de ataque da classe Car Nicobar. Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Car\\_Nicobar-class\\_patrol\\_vessel](https://en.wikipedia.org/wiki/Car_Nicobar-class_patrol_vessel)

- vii) Navios rápidos de ataque da classe PKX, da Marinha da República da Coreia.



Figura 14 – Navio rápido de ataque da classe PKX. Fonte: <https://www.navalnews.com/naval-news/2019/12/hanjin-launched-four-more-pkx-b-pkmr-chamsuri-ii-class-patrol-boats-for-rok-navy/>

Os LCS da USN foram um grande insucesso, de modo geral. No último ano, esses navios, majoritariamente, passaram grande parte do tempo em manutenção ou sem operar, devido aos altos custos. O programa FFG(X) deve apresentar seus requisitos esse ano, mas a Lockheed anunciou que é necessária a apresentação de uma proposta mais tradicional à USN, utilizando hélices ao invés dos hidrojetos instalados nos LCS.

As fragatas sul-africanas utilizam o sistema de propulsão WARP (*Waterjet and Refined Propeller*), o que oferece, ao navio, bastante flexibilidade – característica necessária a um navio que precisa se manter no mar por períodos longos, mas que, em batalha, se necessário, pode utilizar o hidrojato para atingir velocidades próximas dos 30 nós.

As corvetas da classe Visby possuem propulsão exclusiva por hidrojetos e muita tecnologia embarcada. Esse projeto da Saab, em operação desde 2002, apesar de poucas informações disponíveis, já possui uma nova versão em desenvolvimento pela empresa, um indicador de sucesso. O casco e a superestrutura são em Polímeros de Fibra de Carbono Reforçado (PFRC), design comprometido com a redução da assinatura radar do navio. Todo esse conjunto permite que essa classe realize diversas missões, como, por exemplo a contraminagem, a guerra antissubmarina e antissuperfície e a patrulha. Seu conceito se baseia em agir antes de – ou mesmo sem – ser detectada.

Os navios rápidos de patrulha ou ataque, que são empregados por diversas marinhas, em diversos ambientes, são utilizados para lidar com ameaças convencionais ou assimétricas. Eles atingem velocidades da ordem de 55 nós, como o Skjold. São leves, construídos com PFRC, alumínio, fibra de vidro e outros materiais leves, se comparados com o aço. Normalmente, portam mísseis em seu sistema de armas, além de canhões e de metralhadoras. São empregados para caçar navios de superfície de maior porte, além da função de atacá-los e desengajar rapidamente. Utilizá-los em conjunto com um sistema de sensoriamento remoto (radares OTH, sonoboias, hidrofones, entre outros), para saber quando utilizá-los da melhor forma, aumenta ainda mais seu valor estratégico.



## 5. EMPREGO DO HIDROJATO NA MARINHA DO BRASIL

A Marinha do Brasil é responsável por ambientes bastante distintos: os rios na Bacia Amazônica, Bacia Araguaia-Tocantins, Bacia do rio da Prata, Bacia do rio São Francisco e Bacia do Parnaíba; as águas do oceano Atlântico; baías; enseadas; lagoas e lagunas, ao longo da costa. O hidrojato permite emprego flexível, em todos esses ambientes, devido ao seu calado reduzido e à sua grande manobrabilidade. Ainda mais vantajoso, quando lembramos da ausência de apêndices externos ao casco, que poderiam sofrer danos severos ao colidirem com objetos flutuantes (troncos, redes de pesca, lixo e etc.).

As extensões dos nossos rios e da nossa costa também tornam proibitivos, considerando o orçamento disponível, o patrulhamento constante de nossas águas. Hoje, a Marinha do Brasil, cumpre sua missão atuando de forma pontual em regiões com grande necessidade ou através de informações privilegiadas. Por esse motivo, muitas vezes, é necessário se deslocar em alta velocidade de um ponto ao outro, por longos períodos, o que favorece o emprego da propulsão a hidrojato em navios que necessitariam cumprir tal objetivo com grande frequência.

O emprego de navios patrulha rápidos pela MB talvez seja a opção mais interessante dentre as já adotadas por outras marinhas. A MB possui recursos e *expertise* para ampliá-los. Se forem utilizados em conjunto com esse meio, é possível colher ótimos resultados, tanto na economia de recursos e meios quanto alcançando maiores resultados no nível tático e no estratégico. Dentre esses recursos podemos citar as aeronaves de patrulha; as aeronaves não tripuladas; os radares OTH; as sonoboias e os navios de reabastecimento.

Utilizar navios construídos com materiais compostos seria um novo desafio para a MB e para o seu sistema de manutenção, todavia, também seria um grande passo para alcançar diversas marinhas que dominam essa área há pelo menos duas décadas. Atualmente, utilizamos apenas aço e alumínio na construção de nossos navios.

A maior dificuldade encontrada no Brasil, de acordo com De Pinho (2014), é a dependência de empresas estrangeiras, especialmente quando se trata de reposição de peças. Como esse tipo de sistema propulsivo ainda é pouco utilizado no Brasil, os custos,



ao longo de toda a vida útil do navio, são muito altos. Alguns fabricantes, como Wärtsilä, Hamilton e Kongsberg possuem escritórios no Brasil, facilitando o contato. Uma informação interessante a se considerar é o tempo de vida útil dos componentes. A figura a seguir, fornecida pela Wärtsilä, explica o que foi comentado anteriormente:

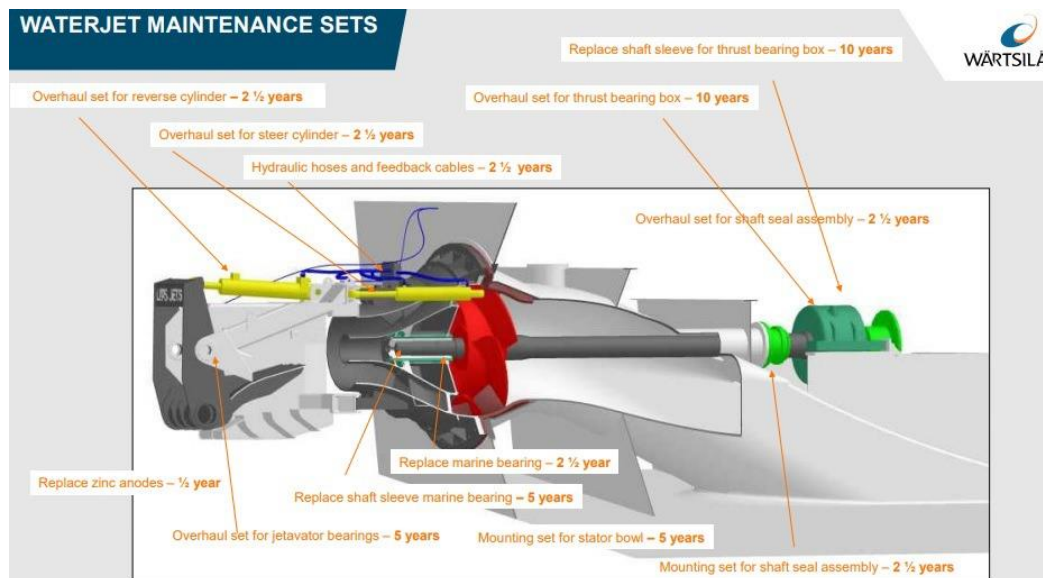


Figura 15 – Vida útil dos componentes do sistema de Hidrojato. Fonte: Wärtsilä

## 6. CONCLUSÃO

Não se prender ao que temos ao nosso alcance foi o que permitiu à humanidade alcançar o nível de conhecimento e de conforto que temos hoje. Tal pensamento também deve ser aplicado às Forças Navais, uma vez que o emprego de novas tecnologias pode solucionar problemas atuais e, além disso, é o único modo de não viver na esteira das demais nações.

O sistema de propulsão a hidrojato já apresenta um grande potencial de emprego nas marinhas ao redor do mundo, uma vez que os benefícios superam o custo elevado. Por exemplo, as marinhas dos países nórdicos – que, apesar dos territórios pequenos, sempre possuíram alta tecnologia – utilizam diversos meios com essa propulsão. No entanto, seu custo ainda é proibitivo para as marinhas com orçamento mais modesto.

A Marinha do Brasil deve continuar a observar a evolução do hidrojato e ponderar seu emprego nos próximos projetos de navios, especialmente os navios-patrolha, como foi comentando no capítulo 5. A capacidade plena de operar um navio com esse sistema de propulsão seria um grande avanço tecnológico e de dissuasão.

**REFERÊNCIAS**

BORETT, D.; RAE, P. Waterjet Applications in Vessels that Operate in Multiple Modes. *Waterjet Propulsion 5*, Londres, dez. 2008.

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

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2015.

PINHO, M. S. As embarcações rápidas e levemente blindadas nas operações fluviais no ambiente operacional do Pantanal. *Revista Giro do Horizonte*, v. 1, n. 2, 2014.

YETMAN, D. S. *Without a Prop*. Indianopolis: Dog Ear Publishing, 2010.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ALLISON, J. L. Marine Waterjet Propulsion. *SNAME*, Nova York, set. 1993.

BULTEN, N.; VERBEECK, R. Off-Design Behaviour of Waterjets. *Waterjet Propulsion* 5, Londres, dez. 2008.

HAMILTON JET. HT Series – The Next Evolution in Waterjet Propulsion Technology. *HamiltonJet*. Disponível em: <https://www.hamiltonjet.com/us/ht-series>. Acesso em: 23 mar. 2020

KONGSBERG. Steel Waterjets. Kongsberg. Disponível em: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/waterjets/steel-waterjets/>. Acesso: 9 dez. 2019.

LARTER, D. B. Lockheed is planning to make a big change for the frigate it's going to offer the Navy. *Business Insider*, 24 out. 2018. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/lockheed-to-drop-littoral-combat-ship-water-jet-propulsion-for-frigate-2018-10>. Acesso em: 22 mar. 2020.

LARTER, D. B. The US Navy's surface fleet: Here's what's ahead in 2019. *Defense News*, 26 dez. 2018. Disponível em: <https://www.defensenews.com/naval/2018/12/26/the-us-navys-surface-fleet-heres-whats-ahead-in-2019/>. Acesso em: 22 mar. 2020

NAVAL TECHNOLOGY. Skjold Class Missile Fast Patrol Boats, Norway. *Naval Technology*. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/projects/skjold/>. Acesso em: 23 mar. 2020.

NAVAL TECHNOLOGY. Swedish Armed Forces receives first Visby-class corvette. *Naval Technology*, 6 set. 2012. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/news/newsswedish-armed-forces-receives-first-visby-class-corvette/>. Acesso em: 3 dez. 2019.

NEWMAN, N. Pump it up! Bigger and better uses for water-jet technology. *E&T – Engineering and Technology*, 2 out. 2019. Disponível em: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2019/10/pump-it-up-bigger-and-better-uses-for-water-jet-technology/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

SAAB. Defining stealth at sea. *SAAB*. Disponível em: <https://saab.com/naval/submarines-and-surface-ships/surface-ships/visby-class-corvette/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

SAAB. Multi-mission Advantage. *SAAB*. Disponível em: <https://saab.com/naval/submarines-and-surface-ships/surface-ships/nextgenerationcorvette/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

---

TÖRNEMAN, G. What do I need to consider when choosing waterjet propulsion? *Nordic Blog*, 27 jun. Disponível em: <https://nordicblog.volvopenta.com/what-do-i-need-to-consider-when-choosing-waterjet-propulsion/>. Acesso em: 23 mar. 2020

---

WÄRTSILÄ. Wärtsila Propulsors: Waterjets Product Guide. *Wärtsila*, 2017. Disponível em: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/gears-propulsors/waterjets/product-guide-o-p-midsize-waterjet.pdf?sfvrsn=2>. Acesso em: 27 mar. 2020.

WIKIMILI. Valour-class frigate. *WikiMili*, 27 dez. 2019. Disponível em: [https://wikimili.com/en/Valour-class\\_frigate](https://wikimili.com/en/Valour-class_frigate). Acesso em: 24 mar. 2020.