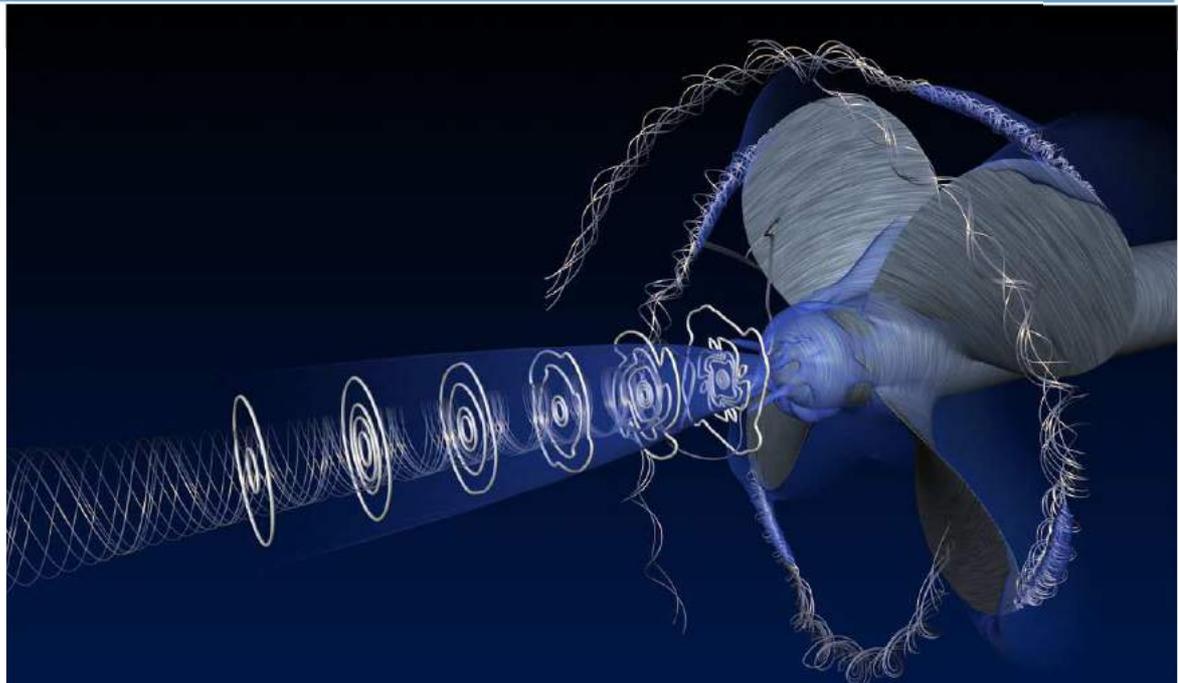


EL SISTEMA PROPULSIVO DEL BUQUE: LAS HÉLICES MARINAS Y EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN



Trabajo final de carrera para la obtención de la Diplomatura en Navegación Marítima

Barcelona, Noviembre de 2013

Autor: Rubén Heras Zurita

Director: Javier De Balle de Dou

A la mar me voy, mis hechos dirán quién soy.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
OBJETIVOS	10
RESUMEN	11
METODOLOGIA	12
MOTIVACIÓN	13
INTRODUCCIÓN	14
EL SISTEMA PROPULSIVO DEL BUQUE: LA HÉLICE	14
<i>Definiciones</i>	15
<i>Partes de la hélice</i>	17
<i>Características</i>	17
EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN	18
<i>Partes y fenómenos en la hélice que pueden causar cavitación</i>	19
Número de palas	19
Superficie de las palas	20
Sección de las palas	20
Núcleo	20
Caída	21
Espacio libre entre la hélice y el casco y vano de la hélice	21
PARTE I: EL SISTEMA PROPULSIVO DEL BUQUE: LA HÉLICE	22
TIPOS DE HÉLICES	22
SEGÚN EL NÚMERO DE PALAS	22
<i>Hélices monopalas</i>	23
<i>Hélices bipalas</i>	24
<i>Hélices tripalas</i>	24
<i>Hélices de más de tres palas</i>	25
SEGÚN SU FORMA Y MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	26
<i>Modulares</i>	26
<i>Moldeadas</i>	26
Aluminio	27
Bronce	27
Acero inoxidable	28
Acero al carbono	28
Carbono	29
Materiales compuestos	29
SEGÚN SU SISTEMA DE PROPULSIÓN	30
<i>Hélices de paso fijo</i>	30
<i>Hélices de paso variable</i>	31
<i>Hélices de paso controlable</i>	31
<i>Sistemas de tobera</i>	33
<i>Azimutales</i>	34
<i>Water Jets</i>	35

<i>Dobles hélices SCHOTTEL</i>	36
TIPOS DE HÉLICES CON DISEÑO AVANZADO	38
AQUAFOIL	38
AQUAQUAD	38
PROPULSORES DE PERFORACIÓN DE LA SUPERFICIE	39
AQUAPOISE 55	39
AQUAPOISE 65	39
AQUAQUIN	40
PROPULSORES ALTAMENTE SESGADOS	40
AQUASTAR	41
PROPULSOR KAPLAN	41
HÉLICES DE EXTREMOS DE PALA CARGADOS	42
<i>Ventajas</i>	42
HÉLICES CONTRARROTATIVAS	43
PROPULSORES DE EJE VERTICAL	45
<i>Voith-Schneider</i>	46
<i>Kirsten-Boeing</i>	46
HÉLICES CON HIPERCAVITACIÓN	47
HÉLICES PARCIALMENTE SUMERGIDAS	47
DETALLES TÉCNICOS DE LA HÉLICE	48
GEOMETRÍA	48
SELECCIÓN DEL TIPO DE HÉLICE	49
TAMAÑO	49
SENTIDO DE GIRO	50
RENDIMIENTO	51
MANIOBRABILIDAD	52
<i>MANIOBRABILIDAD CON UNA HÉLICE</i>	52
<i>MANIOBRABILIDAD CON DOS HÉLICES</i>	52
SELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS	54
DEFINICIONES	54
PUNTOS MÁS IMPORTANTES DE UNA HÉLICE	55
DIÁMETRO	55
PITCH	58
RAKE	58
CUP	60
PARÁMETROS PARA ESCOGER LA HÉLICE ADECUADA	61
SELECCIÓN DE LA HÉLICE CORRECTA	61
TAMAÑO	62
<i>Diámetro</i>	62
<i>Altura</i>	62
CURVATURA	62
SENTIDO DE GIRO	63
<i>Hélices dextrógiras y levógiras</i>	63
PROBLEMAS A EVITAR	63
<i>Ventilación</i>	63
<i>Cavitación</i>	63

PARTE II: EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN	64
GERMINACIÓN Y FASES	64
EL CRECIMIENTO DE LAS BURBUJAS	64
EL COLAPSO	65
TIPOS DE CAVITACIÓN	66
SEGÚN LA FORMA DE PRODUCIRSE	66
<i>Cavitación de vapor</i>	66
<i>Cavitación gaseosa</i>	66
SEGÚN EL GRADO DE DESARROLLO	67
<i>Cavitación incipiente</i>	67
<i>Cavitación desarrollada</i>	67
<i>Cavitación separada</i>	67
<i>Supercavitación</i>	67
SEGÚN SU MORFOLOGÍA	69
<i>Cavitación de burbujas aisladas</i>	69
<i>Cavitación de nube</i>	70
<i>Cavitación de lámina</i>	71
<i>Cavitación de vórtice</i>	72
<i>Cavitación de estría</i>	72
<i>Cavitación en torbellinos en el extremo de la pala</i>	73
<i>Cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice - codaste</i>	73
<i>Cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice - hélice</i>	74
<i>Cavitación en torbellinos originados por el núcleo del propulsor</i>	74
<i>Cavitación en la cara de presión</i>	75
<i>Cavitación por rayas</i>	75
OTROS TIPOS DE CAVITACIÓN	76
<i>Cavitación por exceso de revoluciones por minuto</i>	76
<i>Cavitación por falta de área en aspas</i>	76
EFFECTOS Y CONSECUENCIAS	77
BLOQUEO	77
PÉRDIDA DE PRESTACIONES	77
<i>PÉRDIDA DE RENDIMIENTO</i>	77
VIBRACIONES Y RUIDO	77
EROSIÓN	77
DETERIORO	78
DAÑO POR CAVITACIÓN	78
LUGARES DE APARICIÓN	80
TÉCNICAS DE DETECCIÓN	81
CAÍDA EN LAS PRESTACIONES	81
MEDICIÓN DEL RUIDO GENERADO	81
PRUEBAS DE MAR EN EL TÚNEL DE CAVITACIÓN	82
CASO 1. CAVITACIÓN EN HÉLICES EN TIMÓN - TOBERA	83
INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE GIRO	83
<i>Introducción</i>	83

<i>Planteamiento del problema</i>	84
<i>Programa de trabajo</i>	85
<i>Resultados de los ensayos</i>	86
<i>Ensayos de cavitación</i>	88
<i>Consideraciones finales</i>	91
CASO 2. ANÁLISIS DEL FLUJO EN UNA HÉLICE MARINA	92
<i>Introducción</i>	92
<i>Descripción del banco de ensayos y medidas realizadas</i>	92
<i>Resultados del ensayo</i>	93
<i>Consideraciones finales</i>	94
CASO 3. PULSOS DE PRESIÓN DEBIDOS A CAVITACIÓN	95
INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE LA HÉLICE Y EL CASCO	95
<i>Introducción</i>	95
<i>Ensayos realizados</i>	96
Ensayos realizados con diferentes claras sin cavitación	98
Ensayos realizados con diferentes claras en las situaciones reales del buque	98
Influencia de la potencia	98
<i>Consideraciones finales</i>	99
CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFIA	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FUNCIONAMIENTO DE LA HÉLICE	17
FIGURA 2: RELACIÓN CRECIENTE ENTRE LA SUPERFICIE EXPANDIDA DE LAS PALAS Y EL ÁREA DEL DISCO DE LA HÉLICE	20
FIGURA 3: HÉLICE MONOPALA	23
FIGURA 4: HÉLICE BIPALA	24
FIGURA 5: HÉLICE DE TRES PALAS	24
FIGURA 6: HÉLICE DE CUATRO PALAS	25
FIGURA 7: HÉLICE DE CINCO PALAS	25
FIGURA 8: HÉLICE DE SEIS PALAS	25
FIGURA 9: HÉLICE MODULAR	26
FIGURA 10: HÉLICE DE ALUMINIO	27
FIGURA 11: HÉLICE DE BRONCE	27
FIGURA 12: HÉLICE DE ACERO INOXIDABLE	28
FIGURA 13: HÉLICE DE CARBONO	29
FIGURA 14: HÉLICES DE PASO FIJO	30
FIGURA 15: HÉLICE DE PASO VARIABLE	31
FIGURA 16: HÉLICE CON SISTEMA DE TOBERA	33
FIGURA 17: DIFERENCIA DE FLUJO ENTRE HÉLICES CON Y SIN TOBERA	34
FIGURA 18: HÉLICE AZIMUTAL	34
FIGURA 19: WATER JET	35
FIGURA 20: CONJUNTO DE HÉLICE DOBLE	37
FIGURA 21: HÉLICE DE EXTREMOS DE PALA CARGADOS	42
FIGURA 22: HÉLICE CLT INSTALADA EN BUQUE	43
FIGURA 23: HÉLICES CONTRARROTATIVAS	43
FIGURA 24: HÉLICE CONTRARROTATIVA DUOPROP	44
FIGURA 25: FUNCIONAMIENTO DE LOS PROPULSORES DE EJE VERTICAL	45
FIGURA 26: HÉLICE VOITH-SCHNEIDER	46
FIGURA 27: GEOMETRÍA DE LA HÉLICE (LANZAMIENTO CIRCUNFERENCIAL Y AXIAL)	48
FIGURA 28: SENTIDOS DE GIRO DEL PROPULSOR EN BUQUES CON UNA LÍNEA DE EJES	50
FIGURA 29: SENTIDOS DE GIRO DEL PROPULSOR EN BUQUES CON DOS LÍNEAS DE EJES	51
FIGURA 30: MANIOBRA CON BARCO DE DOS HÉLICES	53
FIGURA 31: DISTANCIAS DE PROTECCIÓN DE LA HÉLICE	55
FIGURA 32: EJEMPLO 1 DE HÉLICE MAL INSTALADA	56
FIGURA 33: EJEMPLO 2 DE HÉLICE MAL INSTALADA	56
FIGURA 34: EJEMPLO 3 DE HÉLICE MAL INSTALADA	57
FIGURA 35: EJEMPLO 4 DE HÉLICES MAL INSTALADAS (FOTOS DE DIFERENTE ÁNGULO)	57
FIGURA 36: PITCH DE LA HÉLICE	58
FIGURA 37: RAKE DE LA HÉLICE (1)	58
FIGURA 38: RAKE DE LA HÉLICE (2)	59
FIGURA 39: DIFERENTES FLUJOS DE AGUA CON DIFERENTE RAKE	59
FIGURA 40: CUP DE LA HÉLICE	60
FIGURA 41: APARICIÓN DE BURBUJAS DE CAVITACIÓN EN LAS PALAS DE UNA HÉLICE	66
FIGURA 42: CAVITACIÓN DE BURBUJAS AISLADAS	69
FIGURA 43: CAVITACIÓN DE NUBE	70
FIGURA 44: CAVITACIÓN DE LÁMINA Y DE NUBE	71
FIGURA 45: CAVITACIÓN DE VÓRTICE DE PUNTA	72
FIGURA 46: CAVITACIÓN DE VÓRTICE DE CUBO	72

FIGURA 47: CAVITACIÓN DE ESTRÍA	72
FIGURA 48: CAVITACIÓN EN TORBELLINOS EN EL EXTREMO DE LA PALA	73
FIGURA 49: CAVITACIÓN EN LA CARA DE PRESIÓN	75
FIGURA 50: ÁLABE DETERIORADO DEBIDO A LA CAVITACIÓN	78
FIGURA 51: IMAGEN GLOBAL Y DETALLADA DE CAVITACIÓN	80
FIGURA 52: TÚNEL DE CAVITACIÓN DEL CEHIPAR	82
FIGURA 53: TOBERA GIRADA	84
FIGURA 54: MONTAJE DEL TIMÓN - TOBERA EN EL TÚNEL DE CAVITACIÓN	85
FIGURA 55: ENSAYO 1. CONDICIÓN 0º	88
FIGURA 56: ENSAYO 2. CONDICIÓN 15º ESTRIBOR	88
FIGURA 57: ENSAYO 3. CONDICIÓN 15º BABOR	89
FIGURA 58: ENSAYO 4. CONDICIÓN 20º BABOR	89
FIGURA 59: ENSAYO 5. CONDICIÓN 20º ESTRIBOR	89
FIGURA 60: ENSAYO 6. CONDICIÓN 25º ESTRIBOR	90
FIGURA 61: ENSAYO 7. CONDICIÓN 25º BABOR	90
FIGURA 62: HÉLICE MARINA EN EL BANCO DE ENSAYOS	92
FIGURA 63: CONTORNOS DE PRESIÓN ESTÁTICA Y DE VELOCIDAD	94
FIGURA 64: SITUACIÓN DE LOS CAPTADORES DE PRESIÓN	97

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: COMPARACIÓN DE HÉLICES SEGÚN SU MATERIAL	29
TABLA 2: SISTEMAS DE PROPULSIÓN CON HÉLICES DE PASO FIJO Y HÉLICES DE PASO CONTROLABLE	32
TABLA 3: SENTIDOS DE GIRO DEL PROPULSOR EN BUQUES CON UNA LÍNEA DE EJES	50
TABLA 4: SENTIDOS DE GIRO DEL PROPULSOR EN BUQUES CON DOS LÍNEAS DE EJES	51
TABLA 5: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS FENÓMENOS DE CAVITACIÓN	86

OBJETIVOS

Mi principal objetivo de este trabajo es conocer bien la hélice y todo su conjunto. Creo que es una de las partes más importantes del buque que nos afecta a nosotros, ya que como futuros pilotos de la marina mercante, debemos saber a la perfección como actúa la hélice de nuestro buque a la hora, sobretodo, de las maniobras. Esto me supondrá mucha más seguridad en las guardias y en las maniobras de entrada y salida de puerto en un futuro próximo.

Además de esto, al no haber sólo un tipo de hélice, debemos conocerlas todas y que ventajas y desventajas conlleva cada una. Sabiendo esto, sabremos cuál es la mejor hélice que hay que poner en cada buque.

Otro de los objetivos es conocer bien el fenómeno que les afecta al sistema propulsivo del buque: la cavitación. Es un tema que me atrae, saber por qué sucede y cómo afecta al buque y a la hélice.

Creo que los objetivos se irán cumpliendo a lo largo del trabajo y espero que pueda servir como manual para todo el que lo necesite en cualquier momento.

RESUMEN

La realización de este trabajo la dividiré en dos partes. La primera consistirá en una explicación sobre todo lo relacionado con las hélices marinas. En la segunda parte me centraré en un fenómeno que les afecta a las hélices: la cavitación.

En la primera parte del TFC, hablaré a fondo sobre todas las partes y características de las hélices marinas; el sistema propulsivo del buque. En este apartado veremos qué tipos de hélices hay según tres factores: número de palas, forma y material de construcción y, su sistema de propulsión. Además, también veremos las nuevas hélices con un diseño tecnológico avanzado. Posteriormente veremos los detalles técnicos de las hélices (geometría, tamaño, sentido de giro, rendimiento y maniobrabilidad), sus puntos más importantes, que son el diámetro, *pitch*, *rake* y *cup*, y por último, qué parámetros tenemos en cuenta para la selección de una hélice en un barco.

En la segunda parte me centraré exclusivamente en el fenómeno de la cavitación, hablando de sus fases, de los tipos que hay, sus efectos y consecuencias, los lugares de aparición, las técnicas de detección de la cavitación y, finalmente, las pruebas de mar que se realizan en el túnel de cavitación.

METODOLOGIA

El trabajo será la suma de extracciones de varios documentos y artículos sobre el tema. El objetivo es explicarlo de forma clara y ordenada siguiendo una relación que nos lleve al objetivo.

Como trabajo de investigación en este trabajo, hablaré con empresas dedicadas a la construcción y reparación de hélices, conociendo los motivos principales de las reparaciones y si tiene que ver con los temas tratados en el trabajo. Para la parte de la cavitación, me pondré en contacto con el Centro de Ensayos Hidrodinámicos del Pardo en Madrid (CEHIPAR) para conocer las pruebas de mar que realizan en el túnel de cavitación, qué parámetros estudian y sus objetivos principales.

Con la información que encuentre en documentos y lo que aprenda en mi investigación mi trabajo me permitirá poder cumplir mi objetivo.

MOTIVACIÓN

Mi motivación para la realización de este trabajo está enfocada en lo que pretendo que sea mi futuro laboral.

Esto lleva varias salidas; mi principal objetivo es poder llegar a ser inspector. Ya sea como inspector de buques una vez terminados y haciendo las revisiones rutinarias o estando trabajando en las pruebas de mar antes de que el buque sea botado. Esto último sí que tiene más relación en el trabajo, ya que tiene que ver más en la maniobrabilidad y teoría del buque. Además, en las pruebas de mar que se realizan en el CEHIPAR de El Pardo, se efectúan, entre otras, las de maniobrabilidad y las del túnel de cavitación.

Otra posible salida, y como ya he explicado antes, es conocer lo que va a realizar el buque según la hélice que llevemos. Esto, como futuro piloto, es imprescindible para evitar posibles abordajes por desconocimiento de la materia.

INTRODUCCIÓN

EL SISTEMA PROPULSIVO DEL BUQUE: LA HÉLICE

A principios del siglo XIX, el ingeniero checo Josef Ressel inventó lo que hoy conocemos como hélice. Su objetivo era el de transmitir por medio de las palas la energía cinética que esas generan. Esto, es lo que la hace la hélice. La primera vez que utilizó la hélice como medio de propulsión fue en el curso del río Krka en Carniola. Años más tarde, en 1821, introdujo su invento en la ruta que comunicaba el puerto de Trieste con Venecia, servido por un vapor de ruedas, que era ineficiente. Pero no fue hasta el 28 de Noviembre de 1826 que Josef pidió la patente austríaca. En 1829 modificó el Civetta, un barco a vapor, el cual zarpó este mismo año. Llevaba una hélice montada movida por una máquina de vapor. El buque llegó hasta los seis nudos, pero la prueba se truncó, ya que la máquina de vapor se rompió.

Las autoridades prohibieron futuros experimentos, y, tras muchos intentos, en el año 1843, Marc I. Brunel diseñó el buque *Great Britain*, el primer barco basado en el nuevo invento que revolucionó la época náutica de ese momento: la hélice.

La hélice usada en este buque se debe al ingeniero sueco John Ericsson. Esta hélice naval (patentada en 1836), basada en el concepto de J. Ressel, pero perfeccionada, pretendía reemplazar la rueda de paletas que se utilizaba entonces. Ericsson hizo que la armada británica se interesara en este nuevo invento. Al cabo de poco tiempo se trasladó a los Estados Unidos de América, cuya marina de guerra aplicó la hélice a la mayoría de sus nuevos barcos. De esta forma, todas las embarcaciones mercantes del mundo empezaron a usarla y se empezó a avanzar en el desarrollo de la técnica náutica y de la navegación.

A partir de 1875 se empezaron a publicar los primeros fundamentos teóricos de los procedimientos para el proyecto de hélices. Estos métodos fueron evolucionando de forma progresiva, incorporando desarrollos realizados en el campo aeronáutico. En esos últimos años, se incorporaron los ordenadores en las tareas de diseño, cosa que permitió utilizar modelos matemáticos cada vez más complejos para realizar el diseño de las hélices marinas.

A mediados del siglo XX se realizaron extensos trabajos de investigación, cuya finalidad era poder explicar de forma más precisa los fenómenos de interacción entre la hélice y el flujo que se desarrolla en la popa del buque. Este conocimiento ha

permitido conseguir mejoras significativas en el comportamiento de la hélice en cavitación y, en consecuencia, en la reducción de los niveles de ruidos y vibraciones a bordo.

Definiciones

La hélice puede recibir muchas definiciones, aquí van unas cuantas:

- Elemento formado por una serie de dispositivos que se denominan palas o álabes, dispuestos de forma concéntrica sobre un eje y que giran alrededor de éste en un mismo plano. Gracias a sus álabes pueden transmitir su energía cinética, creada al girar los álabes, a un fluido de manera que se crea una fuerza de tracción.
- Propulsor que accionado mecánicamente produce una fuerza o empuje a lo largo del eje de rotación cuando gira en un fluido líquido o de gas.
- Conjunto de aletas helicoidales que giran alrededor de un eje y empujan el fluido ambiente produciendo en él una fuerza de reacción que se utiliza para la propulsión de buques.
- Elemento que transforma la energía mecánica que se genera en el motor en fuerza impulsora.
- Elemento físico que se instala o se conecta en el eje del motor. El motor se encargará de hacer girar la hélice a las revoluciones necesarias por minuto para ejercer la fuerza de presión del agua. Estas revoluciones dependerán del modelo y de la capacidad del motor.

Las primeras hélices empleadas se usaron hace miles de años y fueron para los molinos de viento y de agua. Actualmente, las hélices y todos sus dispositivos se usan para muchas cosas, pasando por un simple sistema de refrigeración hasta la generación de electricidad o la propulsión de medios de transporte, como el buque.

La utilización de la hélice es muy amplia y su denominación y aplicación es muy variada, como sus palas, que han adquirido diferentes formas según el propósito que tengan. Ha quedado demostrado que mientras más grande sean, mejor trabajará, pero

la mayoría de las veces el problema reside en encontrar un equilibrio entre el tamaño de la hélice y la capacidad del motor para hacerla girar.

El tamaño de la hélice está condicionado por dos factores: su diámetro total y el peso de las palas (inclinación de las palas y capacidad de impulsar agua). Un diámetro pequeño está asociado a un motor de pequeña potencia.

En lo que refiere a materiales nos encontramos los siguientes:

- **Aluminio:** las más utilizadas debido a la gran cantidad de medidas con que pueden ser fabricadas y las diversas condiciones y revoluciones con que pueden ser utilizadas.
- **Bronce y acero inoxidable:** ofrecen las mejores prestaciones y duración frente al paso del tiempo. Muy adecuadas para buques que se desplacen a alta velocidad.
- **Acero al carbono:** permiten absorber más y mejor, ya que presentan cierto grado de ductilidad que hace que las palas se deformen sin romperse ante el impacto.
- **Carbono:** reúne lo mejor de cada tipo de material usado en la construcción de las hélices.
- **Materiales compuestos:** trabajan bien y tienen un precio no muy alto.

La hélice perfecta debería pesar lo mínimo, ser lo más rígida posible, no verse alterada por el entorno marino y que se pueda reparar con facilidad. Por todo esto, un buen material de construcción sería el titano, ya que es inmune a la oxidación, liviano y muy tenaz. Pero como desventajas encontramos su elevado precio y su dificultad para trabajarlo y repararlo.

A pesar de las muchas hélices que existen, las dos más importantes son las que tienen entre 2 y 4 palas, utilizadas principalmente por motores intraborda con ejes. Los motores fueraborda utilizan hélices entre 3 y 6 palas.

El funcionamiento de la hélice se debe al diferente flujo que se produce entre las caras activa y pasiva, debido a la forma de las secciones de la pala y a su ángulo de ataque (paso de la hélice). Este diferente flujo provoca un empuje, por las diferencias de presión que aparecen, de manera similar a como ocurre en las alas de un avión.

El resultado es que cada pala produce un empuje en la dirección del avance del barco, gracias al movimiento rotatorio del conjunto.

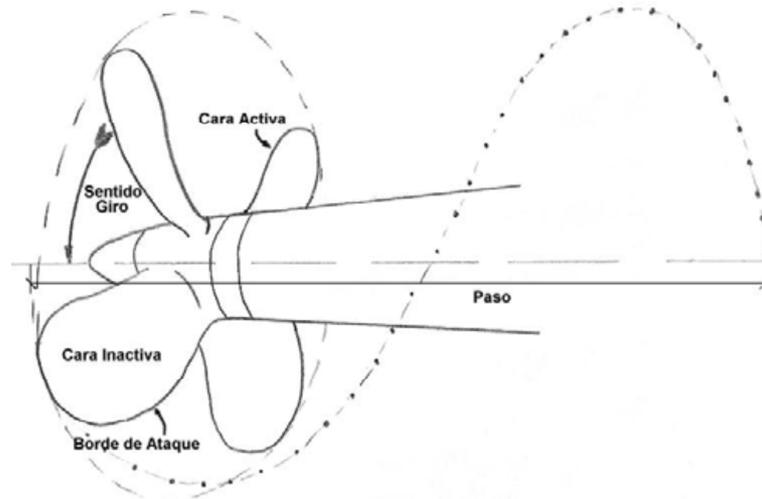


Figura 1: Funcionamiento de la hélice

Partes de la hélice

- Eje: barra donde se monta la hélice y que la hace girar.
- Núcleo: cuerpo central donde se afirman el eje a las palas.
- Capacete: pieza en forma de capuchón que protege el agujero para que no entre agua.
- Pala: piezas que salen del núcleo. Produce empuje de la embarcación mediante el giro.

Características

- Paso: avance cuando da una vuelta completa.
- Retroceso: diferencia entre el avance hipotético y el avance real.
- Diámetro: circunferencia circunscrita a los extremos de las palas.
- Sentido de giro: dextrógiras (paso a la derecha mirando desde proa) o levógiras (paso a la izquierda).

EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN

El fenómeno de la cavitación o aspiración en vacío consiste en un cambio rápido y explosivo de fase líquida a vapor. Si el líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido hierve y forma burbujas (cavidades). Estas cavidades son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita y las cavidades quedan aplastadas bruscamente.

Si las cavidades de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras muy importantes (desgaste) sobre la superficie sólida, que terminan destruyendo el metal.

La cavitación se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible. Esta baja que sufre la presión es debida a los efectos dinámicos de un líquido al escurrir, siguiendo fronteras curvas o alrededor de cuerpos sumergidos.

El fenómeno, generalmente, va acompañado de ruido y vibraciones. Esto causa un efecto de impresión de cómo si fuera grava que golpea en las diferentes partes de la máquina. Cuando por culpa de girar muy rápido o por exceso de velocidad del buque, la presión de la cara anterior de la hélice (situada más a proa) decae a valores muy pequeños, en la zona de depresión se forman burbujas de vapor por culpa del vacío que se ha creado. Cuando las burbujas de vapor que se han creado tan rápidamente salen de esta zona de la hélice y vuelven a una zona con presión normal, se colapsan y se condensan otra vez en líquido. Durante este proceso de condensación, el colapso es muy violento, produciendo vibraciones, ruidos y pérdida de prestaciones. La cavitación puede estropear una hélice mellando sus bordes de ataque, doblando las palas o picando su superficie.

Los elementos que sufren mayor deterioro por este tipo de fenómeno son las hélices, las bombas, las tuberías de combustible, las turbinas de generación hidroeléctrica, etc.

Aunque la cavitación es un fenómeno normalmente identificado como negativo y necesario de evitar, por sus efectos tiene fundamentalmente dos aplicaciones útiles; la limpieza, mediante cavitación y ultrasonido, y la supercavitación, la cual permite el

movimiento de un cuerpo sumergido en un fluido a velocidades superiores a los 500 km/h incluso cercanas a la velocidad del sonido.

Actualmente, la cavitación es debida principalmente a la acción mecánica de impactos rápidos, a manera de explosiones de las partículas de líquido, aunque también es posible que influya la acción química corrosiva.

Evitar la cavitación no es fácil, ya que no se puede controlar en muchos casos el medio líquido. Para estos casos lo que se hace es modificar las geometrías de los elementos y/o realizar un cuidadoso dimensionamiento de los equipos involucrados.

La cavitación, aunque sea ligera, provoca desgaste, ya que “limpia” la superficie del metal y del óxido, el cual es una capa protectora del metal y lo deja al descubierto. En ese instante se crea una pila galvánica, aumentando la erosión de la superficie, ya que el metal está sujeto a la acción de la cavitación y de la corrosión destruyéndose muy rápidamente.

La cavitación se manifiesta con mayor intensidad cuanto más rápido sea la velocidad del barco, es decir, cuanto más deprisa giren las hélices. Se evita reduciendo las revoluciones del motor y aumentándolas paulatinamente. De esta forma, la cavitación también hace disminuir el rendimiento del motor.

La única solución para el problema de la cavitación consiste en cambiar la hélice, si ésta está ya dañada. Se puede examinar la posibilidad de instalar una hélice con más palas o con un diámetro más grande.

Partes y fenómenos en la hélice que pueden causar cavitación

Número de palas

En general, a una velocidad determinada de rotación del eje, cuanto menos palas tenga una hélice, mejor será. Sin embargo, si tiene menos palas, cada una de ellas soportará una carga mayor. Esto puede causar mucha vibración, sobre todo en una hélice de dos palas, y contribuir a la cavitación. Cuando el diámetro de la hélice está limitado por el tamaño del vano, será preferible que el eje gire a menos revoluciones y la fuerza se absorba con un número mayor de palas.

Superficie de la palas

Una hélice con palas angostas¹ resulta más eficiente que una hélice con palas anchas. Sin embargo, las hélices con una relación baja de la superficie de las palas son más propensas a la cavitación, porque el empuje de la hélice se distribuye sobre una superficie más pequeña de las palas. Para prevenir la cavitación, la relación de la superficie de las palas debe ser mayor que el valor más eficiente.

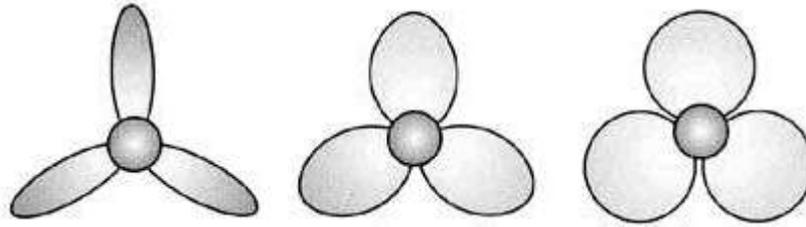


Figura 2: Relación creciente entre la superficie expandida de las palas y el área del disco de la hélice

Sección de las palas

El espesor de las palas de la hélice tiene escaso efecto en la eficiencia dentro de los límites necesarios para que las palas tengan fuerza suficiente. Sin embargo, de forma semejante a la relación de la superficie de las palas, el espesor de la sección puede incidir en la cavitación: las hélices de palas más gruesas producen mayor succión y son más propensas a la cavitación.

Núcleo

El tamaño del núcleo de la hélice afecta directamente a la eficiencia de la hélice. Esto es importante si se considera la instalación de una hélice de paso variable, cuyo núcleo es mayor que otra hélice equivalente de paso fijo. En general, la disminución de la eficiencia debida al mayor tamaño del núcleo de una hélice de paso variable es de un 2% aproximadamente.

Se observa una pérdida de la eficiencia de una magnitud semejante cuando el núcleo es de mayor tamaño, como en muchas hélices de motores fuera borda, por donde se descargan los gases de escape.

¹ La relación entre la superficie total de las palas y el área engendrada por el radio es baja.

Caída

La caída de las palas de una hélice no tiene efectos directos en la eficiencia de ésta, pero los efectos de la interacción entre la hélice y el casco sí son importantes. A menudo, según la forma del vano en el casco, cuanto mayor sea la caída a popa de las palas de la hélice, más grande podrá ser el diámetro de la hélice y la caída pasará a ser muy favorable. Sin embargo, una caída mayor requiere una hélice más fuerte y más pesada, cuya fabricación es más cara.

Espacio libre entre la hélice y el casco y vano de la hélice

La distancia entre la hélice y el casco influye en la eficiencia de funcionamiento de la hélice en el flujo del agua en torno del casco y afecta a la intensidad de la vibración causada por la hélice.

En general, cuanto más grandes sean esas distancias mejor. Sin embargo, si el vano es pequeño, cuanto mayor sean esas distancias, menor podrá ser el diámetro de la hélice y menor será la eficiencia. Si en la fase de diseño se prevé que esas distancias sean grandes, se debe alzar la bovedilla y ello podría exigir que la línea de flotación sea más obtusa inmediatamente a proa de la hélice. Con esto aumentaría la resistencia del casco en el agua. Un vano pequeño requiere una hélice de diámetro pequeño, que quizás no pueda absorber eficientemente toda la potencia del motor, lo que daría lugar a un rendimiento ineficiente, daños en el motor o poca capacidad de arrastre. Se puede encontrar una solución intermedia para un vano pequeño mediante lo siguiente:

- Establecer un nuevo ángulo del eje.
- Utilizar una prolongación del eje.
- Instalar una hélice con una mayor relación área - disco.

PARTE I: EL SISTEMA PROPULSIVO DEL BUQUE: LA HÉLICE

TIPOS DE HÉLICES

SEGÚN EL NÚMERO DE PALAS

Una hélice de una pala sería lo más deseable si ésta pudiera tolerar la vibración. De esta forma, para obtener un nivel aceptable de equilibrio con mucha menos vibración, lo mejor es utilizar una hélice de dos palas. Al añadirse palas, el rendimiento disminuye, pero también el nivel de vibraciones. La mayoría de hélices están compuestas por tres palas formando un compromiso entre vibración, tamaño adecuado, rendimiento y coste. La diferencia de rendimiento entre una hélice de dos o tres palas se considera menos significativa que la diferencia de vibraciones.

El argumento tradicional dice que las hélices de cuatro o más palas son para barcos más lentos, y las de tres o menos palas son las más adecuadas para barcos más rápidos. A pesar de esto, hay otros factores, como el consumo de carburante, el rendimiento y la aceleración en la arrancada que se tienen que tener en cuenta a la hora de escoger una hélice. Este apartado, lo veremos más adelante a fondo, en “Parámetros para escoger la hélice adecuada”. Generalmente, en náutica de recreo y motores pequeños de hasta pocos cientos de caballos de fuerza, se utilizan hélices de tres palas. Los grandes buques mercantes suelen utilizar hélices de cuatro palas, llegando a grandes velocidades de crucero.

Pasar de tres a cuatro palas significa aumentar la superficie de palas en contacto con el agua y, por lo tanto, aumentar la capacidad de desplazamiento de agua y el empuje del motor. Para que el motor trabaje de forma más eficiente con más palas, éstas deberán tener menor ángulo de ataque (paso de la hélice). Es decir, para un mismo motor, una hélice de cuatro palas debería tener un paso menor para permitir que el motor pueda trabajar a las mismas revoluciones que con una hélice de tres palas.

Las mejoras al utilizar una hélice de cuatro palas darán:

- Mayor aceleración.
- Mejor tiempo de planeo.
- Mejor control del buque en bajas y medias velocidades.
- Ganancia en la eficiencia del combustible (en muchas ocasiones).
- Mejor capacidad de arrastre para grandes cargas.
- Capacidad para navegar en mala mar y disminuir los fenómenos de ventilación y de cavitación.

Todo esto ocurre a pesar de que en teoría se disminuye el rendimiento de la hélice al aumentar el número de palas.

Hélices monopalas

Hélices de una pala. Para compensar el efecto de la ausencia de la masa que le falta a la pala, se suele fabricar con una masa pequeña colocada en la raíz de la pala. Tiene su mejor aplicación en modelos de velocidad pura.



Figura 3: Hélice monopala

Hélices bipalas

Hélices de dos palas. Suelen ser las de uso más extendido en veleros por su sencillez de uso y fabricación. No presenta notable resistencia al avance.



Figura 4: Hélice bipala

Hélices tripalas

Hélices de tres palas colocadas a 120° entre sí. Confieren a los modelos un sonido y aspecto realísticos, por lo que son muy utilizadas en el mundo de las maquetas.



Figura 5: Hélice de tres palas

Hélices de más de tres palas

Existen hélices de cuatro, cinco y más palas, pero su uso no está muy extendido en las embarcaciones de recreo debido a la poca variedad que tienen de tamaño y aplicaciones. Su uso queda reducido prácticamente al uso de las maquetas o en grandes buques mercantes.



Figura 6: Hélice de cuatro palas



Figura 7: Hélice de cinco palas



Figura 8: Hélice de seis palas

SEGÚN SU FORMA Y MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Las formas y el material que se usan en la construcción de las hélices son tan variables como tipos de embarcación en las cuales se las va a utilizar. Pero se pueden distinguir dos tipos de hélices en función de su construcción: modulares y moldeadas.

Modulares

Hélices utilizadas en barcos de gran porte. Su construcción se basa en el ensamblado de grandes piezas de material, normalmente acero, y que en conjunto forman la propela totalmente armada.



Figura 9: Hélice modular

Moldeadas

Hélices utilizadas en barcos de eslora máxima no superior a 200 pies (60 metros aproximadamente). Son de una sola pieza de fundición montada sobre un mango elástico sobre el eje de la misma. Por norma general es de goma o de material similar y sirve para amortiguar los golpes que pueda recibir la hélice estando en funcionamiento.

Actualmente se construyen hélices íntegramente de materiales plásticos y polímeros basados en la estructura del nylon, ofreciendo varias ventajas, como poco peso, gran resistencia y bajo precio.

Los materiales pueden ser:

Aluminio

Las hélices de aluminio son las más utilizadas por los motores de uso general. Como ventajas encontramos su bajo coste y su facilidad en romperse en caso de colisión con algún elemento duro sumergido. De esta forma protege los dispositivos más delicados del motor. Por el contrario, el aluminio es un material muy quebradizo y con el tiempo su superficie se vuelve porosa y frágil perdiendo ductilidad.



Figura 10: Hélice de aluminio

Bronce

Las hélices de bronce tienen una gran resistencia al deterioro que causa el agua en los materiales metálicos que componen los dispositivos de propulsión, sobre todo aquellos que actúan en medios con una salinidad muy alta, como el agua marina. De cierta manera absorben los golpes, ya que permiten algún grado de deformación.



Figura 11: Hélice de bronce

Acero inoxidable

Las hélices de acero inoxidable son las preferidas por los navegantes, pero no las más recomendadas. Su extrema dureza le preserva de roturas y deformaciones a la hora de colisiones, pero el esfuerzo que no es absorbido es transmitido de forma peligrosa a los elementos de transmisión. También es relativamente liviana y prácticamente son inmunes a los ataques químicos del agua. Otra desventaja que tiene este tipo de hélices es su elevado coste.



Figura 12: Hélice de acero inoxidable

Acero al carbono

Este tipo de hélices están construidas íntegramente con acero al carbono de baja dureza. Esta aleación permite absorber más y mejor los golpes, ya que presentan un cierto grado de ductilidad que les permite a las palas que se deformen sin romperse. Como ventaja también encontramos su resistencia a la salinidad y su bajo peso. Por lo que refiere el precio, se encontraría por encima de las hélices de aluminio, pero por debajo de las hélices de acero inoxidable.

Carbono

Las hélices de carbono son utilizadas en equipos de alto rendimiento. Reúnen las mejores ventajas de cada tipo de material usado en la construcción de las hélices. Su única desventaja es su elevado precio.



Figura 13: Hélice de carbono

Materiales compuestos

Las hélices de varios materiales tienen un coste y un peso bajo, pero en caso de que tenga algún defecto, ésta no se podrá reparar.

Tabla 1: Comparación de hélices según su material

	Peso	Flexibilidad	Reparabilidad	Coste
Aluminio	Medio	Pequeña	Fácil	Medio
Bronce	Alto	Baja	Fácil	Alto
Acero inoxidable	Alto	Baja	Difícil	Alto
Materiales compuestos	Bajo	Media	No es posible	Bajo

SEGÚN SU SISTEMA DE PROPULSIÓN

En este apartado encontraremos todos los tipos de hélice en función de cómo trabajan este tipo de hélices. Además veremos los sistemas de propulsión más avanzados que existen y que ya se utilizan en algunas embarcaciones.

Hélices de paso fijo

Este tipo de hélices es la más común debido a su relativo bajo precio. También se conocen como de “paso constante”; lo que significa que el paso en toda la superficie del aspa, exceptuando sus ángulos, no cambia. Estas hélices se utilizan en la mayoría de embarcaciones comerciales, como pueden ser remolcadores, pesqueros de diferentes tipos (arrastreros...), etc.



Figura 14: Hélices de paso fijo

Hélices de paso variable

Como acabamos de comentar, la mayoría de las hélices son de paso fijo, es decir, tienen un paso constante, pero hay algunas aplicaciones especiales (grandes buques o embarcaciones de alta velocidad) donde es necesario obtener la máxima eficiencia posible. En este tipo de hélices, el paso puede variar en cada radio dependiendo del diseño, pero lo más común es encontrarse aquellas donde usualmente se reduce el paso cerca de las puntas para reducir la presión de las aspas y la posibilidad de cavitación.

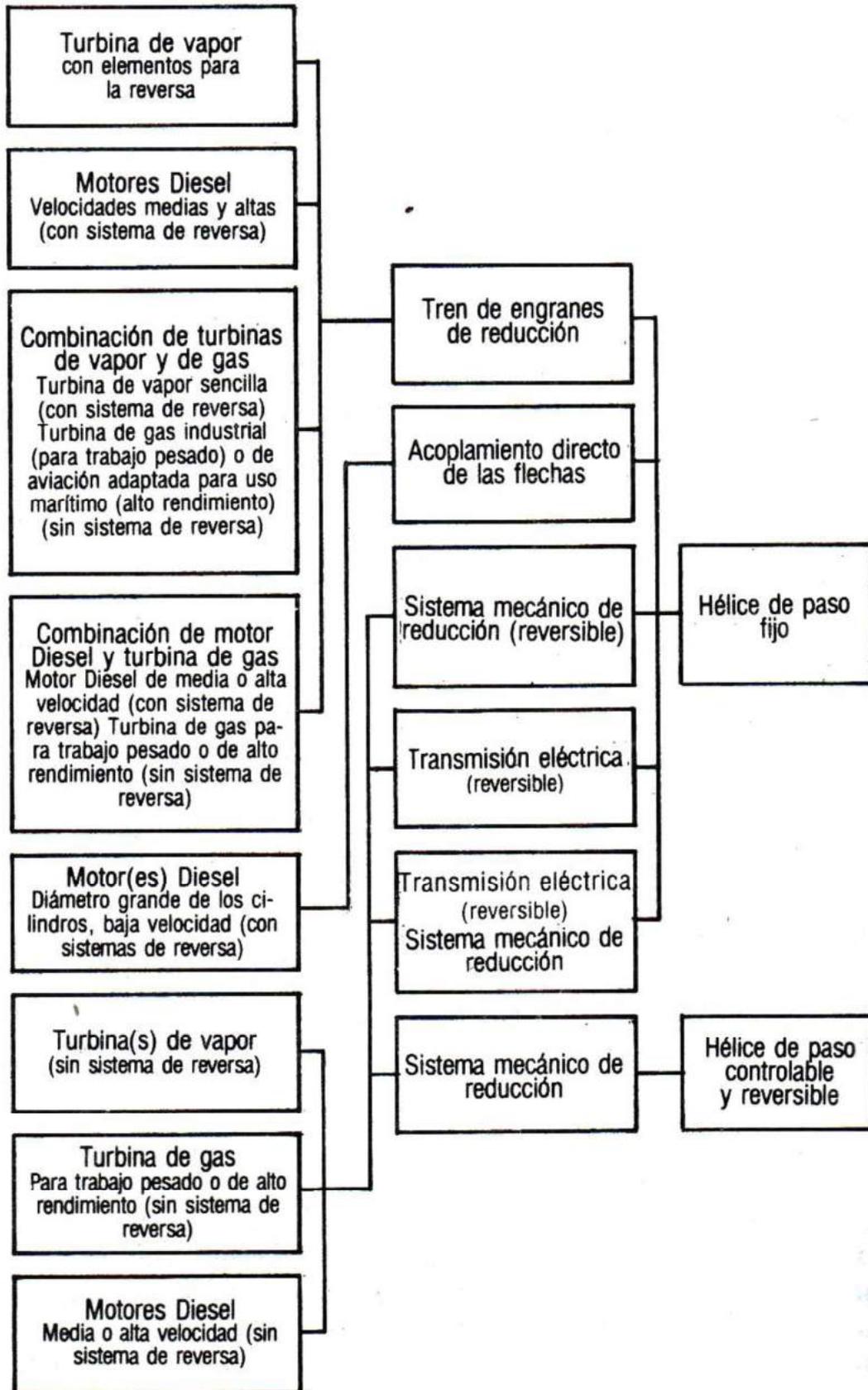


Figura 15: Hélice de paso variable

Hélices de paso controlable

Este tipo de hélices permiten al operador ajustar el paso a voluntad dependiendo del tipo de operación que se tenga que realizar. Esto es debido al mecanismo hidráulico o mecánico que permite que las aspas giren sobre su propio eje. Ofrecen una gran ventaja en cuanto al costo de operación, pero son considerablemente más caras que las sólidas.

Tabla 2: Sistemas de propulsión con hélices de paso fijo y hélices de paso controlable



Sistemas de tobera

Las hélices en tobera están rodeadas por un perfil hidrodinámico, cuya principal ventaja es el incremento del empuje, cerca del 40%. Existen diferentes tipos de perfiles que reducen la velocidad, pero ya hay nuevos diseños que la aumentan comparadas con cualquier hélice standard. Hay toberas diseñadas para obtener el máximo desempeño hacia delante y otras para ambas direcciones, es decir, empuje hacia proa y hacia popa. El flujo de agua se acelera en el disco de la hélice debido a la presencia de la tobera. Esto permite aumentar el coeficiente de estela y el rendimiento de la hélice. Éste rendimiento es notable cuando el resbamiento de la hélice es importante, como ocurre en los remolcadores. Existen sistemas que permiten que se pueda girar la tobera alrededor de un eje vertical. De esta manera el propulsor se puede hacer utilizar como timón.

Conviene instalar una tobera cuando la canalización de la hélice puede dar como resultado ahorros considerables de combustible o un aumento de la capacidad de arrastre, pero no en todos los casos.

La aplicación de estos equipos está limitada a embarcaciones de baja velocidad, inferior a 14 nudos como arrastreros, remolcadores y dragas.



Figura 16: Hélice con sistema de tobera

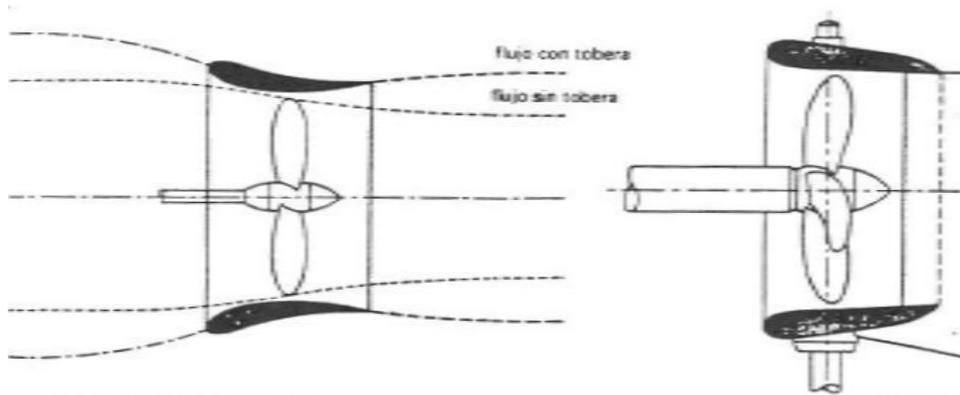


Figura 17: Diferencia de flujo entre hélices con y sin tobera

Azimutales

Opción más avanzada cuando la maniobrabilidad es realmente valiosa para la operación del barco, ya que estos sistemas giran 360° y el empuje puede direccionarse hacia cualquier lado. Sus ventajas principales son la eficiencia eléctrica, su mejor uso del espacio y menores costes de mantenimiento. Los buques con este tipo de hélices no necesitan remolcadores para atracar, aunque los requieren para maniobrar en lugares difíciles. Existen con o sin tobera y se aplican para embarcaciones comerciales que operan por debajo de 14 nudos.



Figura 18: Hélice azimutal

Water Jets

Estos propulsores a chorro consisten en una turbo bomba que aspira el agua del mar y la expulsa a gran velocidad a través de una tobera, orientable en la mayoría de los casos, lo que permite la maniobra. Este sistema tiene un gran rendimiento para altas velocidades, mientras que es muy poco eficiente para bajas velocidades.

Las calificamos como hélice debido a su parecido, pero realmente actúa más como bomba que como hélice, ya que está instalado en el interior del buque.

Las diferencias entre hélice y Water Jet son las siguientes:

- La hélice es muy sensible a la velocidad y dirección del flujo de agua que le llega. Percibe el buque en su situación hidrodinámica (estado de la mar, viento, calado, etc.) así como al motor diésel.
- El Water Jet funciona como una bomba en tanto que existe agua en el colector de admisión y transforma la potencia efectiva al freno en empuje. Hay una mínima sensibilidad al buque.



Figura 19: Water Jet

Dobles hélices SCHOTTEL

Es el sistema de propulsión superior para todo buque en el rango de media velocidad. Este sistema convierte la potencia del motor en la potencia de empuje óptima y brinda la posibilidad de rotación de la parte sumergida en 360°, posibilitando de esta forma que el total de la potencia de entrada sea usada para la maniobra de la embarcación. Las dos hélices giran en la misma dirección.

Las características que nos proporciona el principio hidrodinámico son:

- Distribución de la potencia entre dos hélices disminuye la carga en la hélice aproximadamente un 50%.
- Recuperación de las pérdidas rotacionales de la hélice frontal por medio de un sistema de difusor integrado que consiste en ejes y aletas.
- La forma más favorable de alojamiento.

Las características que nos proporciona el principio mecánico son:

- Ambas hélices en un eje giran en la misma dirección.
- Probada transmisión de potencia al no tener engranaje adicional.
- Sólo un kit de sello adicional.

Los resultados al llevar esta doble hélice SCHOTTEL son los siguientes:

- Eficiencia significativamente mayor que el sistema de transmisión-Z con sólo una hélice.
- Mayor transmisión de potencia que con sólo una hélice.
- Menor riesgo de cavitación debido a la menor carga en las hélices.
- Menos fluctuaciones en la presión y menos emisiones de ruidos.
- Menos pérdidas mecánicas que con otros sistemas con dos hélices.
- Alta confiabilidad debido al reducido número de piezas móviles.
- Totalmente orientable (360°)
- Alta variabilidad de la curva de características que alcanza para una gama amplia de exigencias operacionales para velocidades de hasta 28 nudos.
- Particularmente adecuada para instalaciones que solamente puedan acomodar hélices de diámetro limitado (calado restringido o mínima distancia exigida a la descarga).

Los ejemplos que tenemos con la utilización de esta doble hélice queda limitado a algunas embarcaciones de pasaje, aunque también encontramos otro tipo de buques. Estos son un barco de investigación, un buque de investigación oceanográfica, un buque de investigación sismográfica, un buque de suministro en alta mar y de algún yate privado.

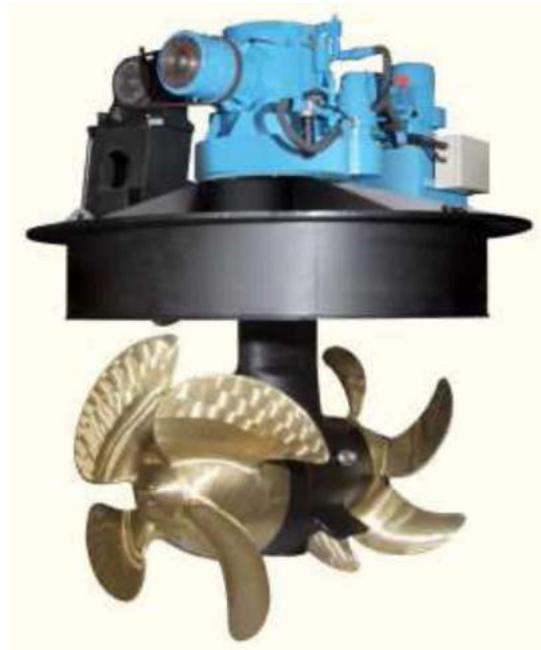


Figura 20: Conjunto de hélice doble

En el siguiente apartado, veremos otro tipo de dobles hélices, pero dispuestas de otra manera y que reciben otro nombre: las hélices contrarrotativas.

TIPOS DE HÉLICES CON DISEÑO AVANZADO

En este apartado veremos diferentes diseños que se realizan en las hélices para conseguir diferentes objetivos. Por último, veremos tipos de hélices revolucionarios, siguiendo la vía del diseño avanzado en nuestro sistema propulsivo.

AQUAFOIL

Con el Aquafoil está la cara combada del cabeceo; continúa siendo una de las hélices estándares más sofisticadas disponibles. Ésta es la razón por el cual es utilizado como equipo estándar por los fabricantes más exigentes de embarcaciones. El Aquafoil puede tener tres o cuatro aletas. Éstas últimas, son ideales para el uso donde se está transmitiendo un alto grado de caballos de vapor o cuando la hélice está funcionando en un túnel.

AQUAQUAD

Se ha desarrollado para solucionar los problemas de vibración encontrados en las grandes embarcaciones de recreo cuando están acoplados a los motores de gran potencia. El diseño de cuatro palas da a la hélice la mordedura y la aceleración de un propulsor de tres palas, con una suavidad sólo mejorada por el Aquaquin. El material utilizado es el bronce extensible de alto manganeso o bronce de aluminio de níquel, y deber ser ordenado con una pulgada menos de cabeceo que el equivalente a la hélice de tres palas para que mantenga la misma carga de motor. También puede ser tapado en el borde posterior.

PROPULSORES DE PERFORACIÓN DE LA SUPERFICIE

Este tipo de propulsor fue utilizado por los corredores de lanchas motoras de alta mar, pero ahora los constructores de yates de alta velocidad de motor los equipan con propulsores que perforan la superficie como equipamiento estándar. Los bordes principales con forma cimitarra² se diseñan para cortar el agua con la resistencia mínima. Este propulsor está sometido a tensiones muy altas y se debe fabricar con tolerancias que varíen muy poco del tamaño original. Estos propulsores son siempre dinámicamente equilibrados y hechos de bronce de aluminio alto en níquel de gran resistencia o de acero inoxidable.

AQUAPOISE 55

Se considera el estándar de la industria para los cruceros de motor interior de velocidad media y es diseñado para usos donde suavidad y funcionamiento son esenciales. El diseño de la pala da menos deslizamiento que el propulsor tradicional de lámina o de turbina. Puede ser utilizado en embarcaciones cuando la potencia se considera demasiado alta. Sus materiales de fabricación son el bronce extensible alto en manganeso o el bronce de aluminio de níquel.

AQUAPOISE 65

Se utiliza generalmente en barcos de gran potencia y como equipamiento estándar en las embarcaciones de recreo de alto rendimiento, aduanas, policía y lanchas patrulla. Puede ser fijado en el borde posterior y tiene el efecto de reducir el deslizamiento y la cavitación mientras que aumenta el volumen de flujo y, por lo tanto, la velocidad del barco. Su precio es más elevado que el anterior, pero tiene más esperanza de vida. Se moldea en el bronce de aluminio de níquel debido a sus partes tan finas.

² Especie de sable de hoja curva y con un solo filo que se va ensanchando a partir de la empuñadura

AQUAQUIN

Fue diseñado para la gama alta del mercado de los yates de recreo. Este tipo es adecuado para esas embarcaciones de gran potencia donde es más importante un rendimiento suave y libre de vibración que la aceleración inmediata y velocidad máxima. La pala adicional que tiene la hace ideal para las instalaciones donde es escasa la inclinación de la extremidad del propulsor.

Muchos fabricantes han intentado copiar el Aquaquin pero construir refinamientos tales como secciones de perfil aerodinámico, bordes anti-canto y el alto sesgado de las láminas hace que sea imposible su copia.

PROPULSORES ALTAMENTE SESGADOS

Estos propulsores son una innovación en la industria del propulsor.

Las hélices altamente sesgadas son, actualmente, un equipamiento estándar en los yates de lujo a motor, transbordadores rápidos, buques patrulla y otras embarcaciones de alta velocidad donde el bajo ruido y el suave funcionamiento son una característica esencial exigida por los navíos sofisticados de la actualidad.

Al diseñar este tipo de hélice se debe tener en cuenta el alcanzar el correcto equilibrio entre el grosor de la sección y el grado de sesgado.

Es fabricado generalmente aluminio de níquel y se diseña especialmente para satisfacer las peticiones del cliente. De vez en cuando, este tipo de hélice se diseña para cumplir con las reglas de las sociedades de clasificación.

AQUASTAR

Se diseña para dar un funcionamiento y maniobrabilidad óptimos en todo tipo de embarcaciones. Las partes de la aleta y las dimensiones abundantes del cubo transmiten una fuerza y una resistencia excepcionales. Como el estándar, las láminas se rastrillan a popa y tienen cierta curvatura, que asegura suavidad incluso al funcionar cerca de un codaste ancho. Con un fino equilibrado y suministrado como estándar con un acabado de disco de alta calidad, el Aquastar es elaborado con bronce extensible de alto manganeso como estándar, pero también los hay de bronce de aluminio.

PROPULSOR KAPLAN

Se diseña para el uso en los barcos pesqueros de arrastre, los remolcadores y otras embarcaciones donde un inyector es encajado para dar mayor empuje que un propulsor convencional. Este tipo de propulsor, normalmente dará entre un 25% y un 30% más de empuje a los barcos arrastreros, mientras que en los remolcadores se ha comprobado que dará hasta un 50% más de empuje en ciertas aplicaciones.

La cara plana del cabeceo de Kaplan facilita la fácil y barata reparación, mientras que sus partes cerca de la raíz transmiten gran fortaleza y una gran resistencia al choque.

En esta primera parte hemos visto los diferentes objetivos que se consiguen con cada tipo de hélice. Cabe decir, que aunque algunas se utilicen en el mismo tipo de barcos, como remolcadores, yates, etc., será el armador el que elija que tipo de hélice quiere o le conviene más para su barco.

Estas hélices proporcionan diferentes características de diseño avanzado con la máxima eficiencia para satisfacer aquellos propósitos que tenga cada armador.

En esta segunda parte de este apartado, veremos los tipos de hélices más revolucionarias que existen actualmente.

HÉLICES DE EXTREMOS DE PALA CARGADOS

Estas hélices incorporan unas placas de cierre en los extremos de las palas que permiten que la distribución radial de empuje en la pala tenga su máximo más cerca del extremo, mejorando de esta forma su rendimiento.

La resistencia mecánica de las palas es más crítica que en una hélice convencional. Existen varias patentes, que se diferencian en la forma y la disposición de las placas de cierre.

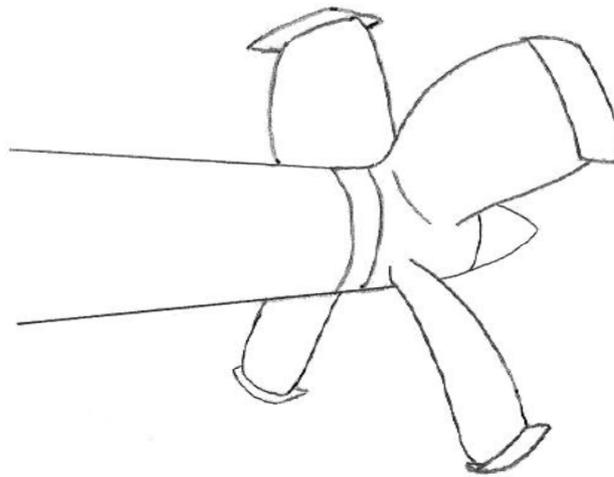


Figura 21: Hélice de extremos de pala cargados

Ventajas

- Tienen un rendimiento propulsivo más alto que permite reducir la potencia necesaria para alcanzar una determinada velocidad, lo que se traduce en un ahorro de combustible entre el 7% y el 12% a igualdad de velocidades. Alternativamente, a la misma potencia propulsora, estas hélices permiten aumentar la velocidad del buque entre 0.3 y 0.6 nudos.
- Los niveles de vibraciones sobre el buque para estas hélices son considerablemente inferiores que en las hélices convencionales, debido a la menor depresión en la cara pasiva de las palas, con una extensión de cavitación mucho menor y menos fluctuaciones de presión.

- A igualdad de potencia propulsora se obtiene una mejor respuesta del buque a la acción del timón y, de esta forma, mejores características de maniobrabilidad, con curvas de evolución de menor radio y menor distancia de frenada.
- Con este tipo de hélices, se reducen las emisiones de CO₂ a la atmosfera. También hay que destacar que con estas hélices se tiene mayor autonomía, tiene menor diámetro óptimo, su comportamiento es mucho mejor para las palas en condiciones distintas a las de diseño y tiene mayor velocidad de inyección de la cavitación.



Figura 22: Hélice CLT instalada en buque

HÉLICES CONTRARROTATIVAS

Este tipo de hélices son de palas fijas montadas coaxialmente en el mismo eje. Se caracterizan por una mayor eficacia propulsiva al incrementarse el rendimiento rotativo relativo.

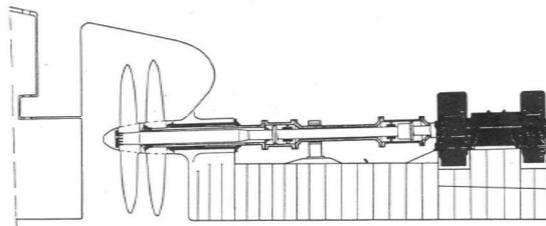


Figura 23: Hélices contrarrotativas

También debemos hablar de la hélice contrarrotativa patentada por Volvo Penta en 1982: la doble hélice Duoprop. Este fue el mayor evento en el mundo marítimo desde que se inventó la hélice. Estas dos hélices contrarrotativas generan una gran potencia y producen un empuje sin rival, así como un posicionamiento recto y real, incluso marcha atrás, además de una mayor aceleración en el deslizamiento.

Las dos hélices eliminan las fuerzas laterales existentes en los motores convencionales dentro - fuera borda de una sola hélice. Esto significa que la energía y la potencia del motor se concentran en dirigir la embarcación hacia delante y no hacia los laterales.

Las principales características que nos ofrece esta hélice contrarrotativa son:

- **Posicionamiento recto:** la transmisión de potencia es clara y uniforme nada más iniciarse.
- **Aceleración más rápida:** aporta una aceleración hasta un 30% más rápida y produce una velocidad máxima alrededor de un 5% superior a cualquier sistema convencional de una sola hélice, sin aumentar el consumo de combustible.
- **Deslizamiento más rápido:** gracias a la mejora del agarre en el agua, la embarcación se eleva y se desliza con más rapidez, permaneciendo en este estado con menos revoluciones.
- **Mejor capacidad de maniobra:** tiene un gran agarre, incluso al realizar giros cerrados a gran velocidad. Reduce la tendencia a volcar.
- **Menor nivel de vibración y ruidos:** produce menos niveles de vibración y ruidos debido a que los impulsos de aceleración se distribuyen sobre más palas. Con las hélices contrarrotativas, prácticamente no existe en el fenómeno de cavitación, aunque puede aparecer en la segunda hélice.



Figura 24: Hélice contrarrotativa Duoprop

PROPULSORES DE EJE VERTICAL

Este tipo de propulsores consisten en un disco que gira alrededor de un eje vertical y del que cuelgan varias palas, entre cinco y ocho. Estas van cambiando su posición durante el giro, de tal manera que adoptan siempre un ángulo conveniente para que el empuje se produzca siempre en la dirección deseada.

El propulsor actúa también de timón y de mecanismo de inversión de marcha, proporcionando gran maniobrabilidad. Por el contrario, su rendimiento es menor que el de una hélice convencional.

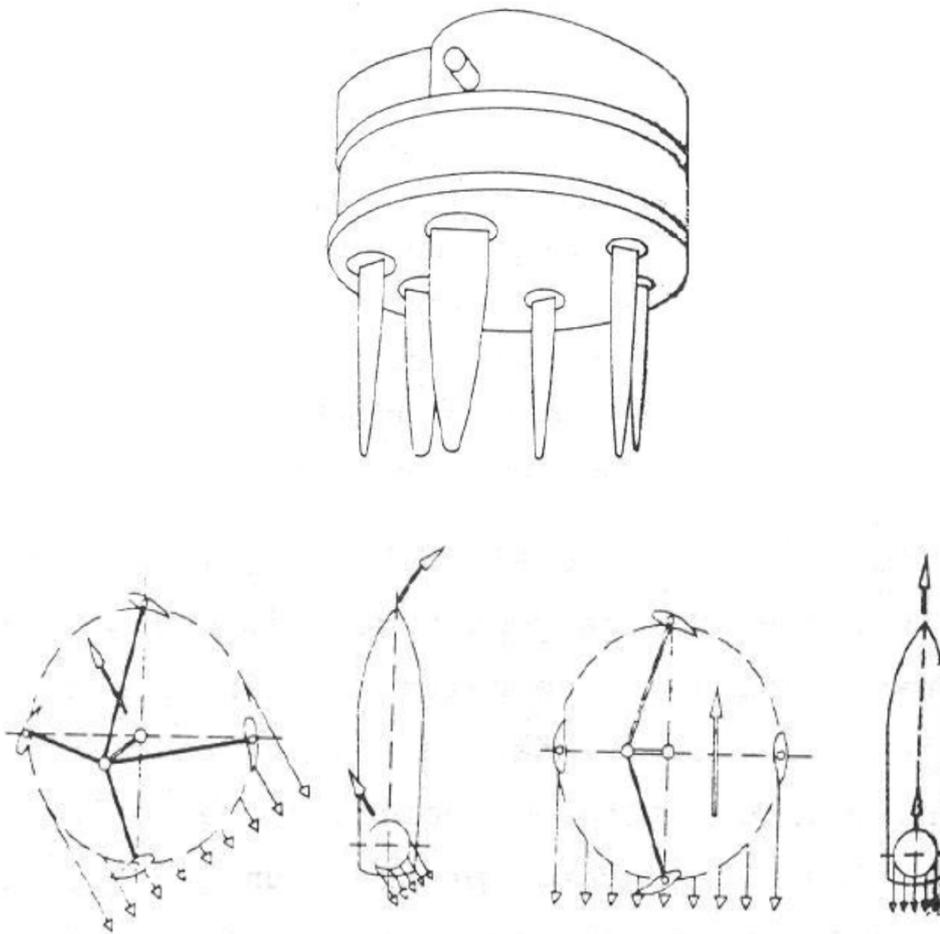


Figura 25: Funcionamiento de los propulsores de eje vertical

Hay dos patentes de este tipo de propulsores:

Voith-Schneider

Las palas realizan una revolución completa alrededor de su propio eje por cada revolución del disco.

Para transmitir la potencia desde la flecha horizontal al disco se emplea un engranaje cónico. Esto impone limitaciones a la potencia máxima que puede transmitirse, pero, aunque el propulsor es 30% o 40% menos eficiente que las hélices de tornillo, tiene ventajas de maniobrabilidad. Los propulsores de este tipo también se han usado en la proa, para ayudar en las maniobras.



Figura 26: Hélice Voith-Schneider

Kirsten-Boeing

Las palas están interconectadas por engranajes de tal forma que cada una realiza media revolución alrededor de su eje por cada revolución del disco.

HÉLICES CON HIPERCAVITACIÓN

Cuando la parte posterior de una hélice presenta cavitación en toda su área, al aumentar las revoluciones por minuto no se reduce la presión en la parte posterior, pero la de la cara continúa aumentando y hace que el empuje total crezca con una relación menor que antes que empezara la cavitación. La ventaja de las hélices con cavitación total es la ausencia de erosión en la parte posterior y menos vibración. Aunque las características de tales hélices se han determinado por medio de pruebas y tanteos, se han utilizado bastante en lanchas motoras de carreras. El diseño de la sección de la pala debe asegurar una separación limpia del flujo en los bordes de entrada y salida, y proporcionar relaciones de empuje - resistencia de alta eficiencia. Introduciendo aire en la parte posterior de las aspas (hélices ventiladas), se logra la cavitación completa con velocidades menores.

HÉLICES PARCIALMENTE SUMERGIDAS

La resistencia presentada por las hélices de vehículos de alta velocidad, como lanchas planeadoras, hidroplanos y naves de efecto superficie, condujo al desarrollo de las hélices parcialmente sumergidas. Aunque todavía faltan por resolver muchos problemas de vibración y resistencia, debido a las cargas cíclicas sobre las aspas al entrar y salir del agua, se ha demostrado que los rendimientos, cuando la hélice está parcialmente sumergida, son semejantes a los de la operación con la hélice totalmente sumergida y sin cavitación. Los rendimientos de estas hélices pueden considerarse dentro de un amplio rango de posibilidades.

DETALLES TÉCNICOS DE LA HÉLICE

GEOMETRÍA

Debemos conocer la geometría básica de la hélice para entender su acción hidrodinámica. En la figura que vemos a continuación vemos qué es el lanzamiento axial de la pala y el lanzamiento circunferencial de la hélice. El uso del lanzamiento circunferencial de la hélice se ha demostrado muy efectivo en la reducción de esfuerzos vibratorios, vibraciones inducidas por la presión del casco y en retrasar el desarrollo de la cavitación. Con el lanzamiento axial, los esfuerzos sobre la pala pueden controlarse y pueden utilizar secciones de pala ligeramente más delgadas, lo que se considera como ventaja desde el punto de vista de consideraciones hidrodinámicas de la propia pala.

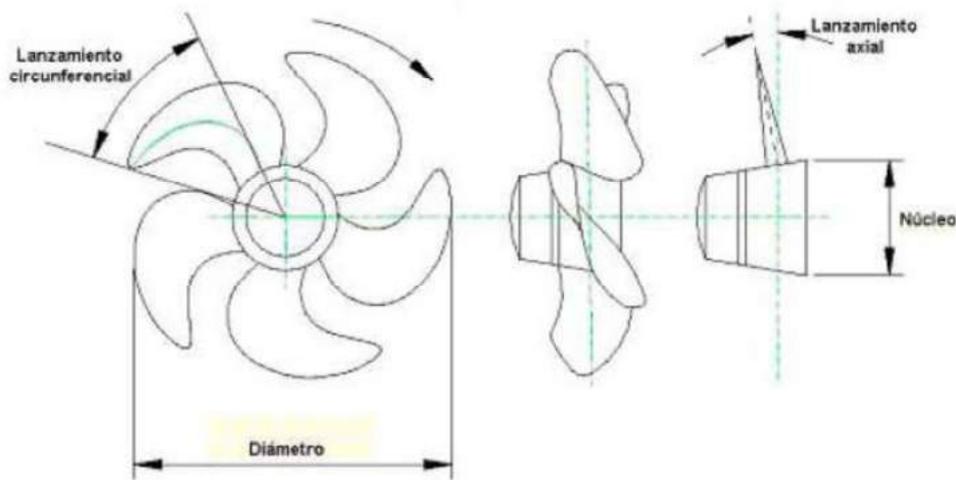


Figura 27: Geometría de la hélice (lanzamiento circunferencial y axial)

Cada hélice tiene un núcleo para fijar las palas de la hélice y para ubicar el mecanismo de control de las palas en el caso de hélices de palas orientables. Esto da como resultado diferentes tipos y tamaños de núcleos para hélices de palas fijas y para las hélices de palas orientables. Esta es una característica diferencial entre ambos tipos de hélices.

SELECCIÓN DEL TIPO DE HÉLICE

La selección de una hélice de palas fijas o de palas orientables para una aplicación particular tiene diferentes factores. Estos factores pueden determinarse para conseguir el máximo rendimiento respecto a:

- Limitación de ruido.
- Facilidad de mantenimiento.
- Coste de la instalación.

Cada buque tiene que ser estudiado y considerado para la aplicación que vaya a tener. La elección entre una hélice de paso fijo y una hélice de palas orientables ha constituido, a lo largo del tiempo, un debate entre los componentes de los sistemas implicados. Las hélices de palas orientables tienen un predominio total en buques Ro - Ro, ferris y en remolcadores de potencia superior a 1500 kW. Para todas las demás aplicaciones el uso de las hélices de paso fijo, parece ser en principio, una solución satisfactoria. Si comparamos la fiabilidad entre estos dos tipos de hélices, se ha demostrado que las hélices de palas orientables han conseguido un estatus excelente como componente esencial de la propulsión.

La hélice de palas orientables tiene la ventaja de permitir el funcionamiento de la hélice a velocidad constante. A pesar de que se pierda rendimiento, permite el uso de generadores accionados por el eje de cola en el caso de que este sea un requisito del perfil operativo del buque.

TAMAÑO

La determinación del diámetro de la hélice para una potencia a una velocidad de la hélice y una velocidad del buque es bastante complejo. Para algunas hélices existen procedimientos matemáticos, pero también se pueden dirigir directamente las cuestiones al fabricante de la hélice.

El tamaño de una hélice no se puede calcular solo de forma teórica, sino que también se tiene que adaptar al buque. El buque debe disponer del espacio suficiente para la hélice, incluyendo un huelgo suficiente entre la hélice y el casco. Debido a los efectos hidrodinámicos y/o de cavitación, el casco del buque y el timón pueden ser excitados

mecánicamente, lo que puede causar fuertes vibraciones en la popa y en el timón, con la posibilidad de fallos mecánicos.

SENTIDO DE GIRO

El sentido de giro puede tener consecuencias respecto a la maniobrabilidad y el rendimiento.

Tabla 3: Sentidos de giro del propulsor en buques con una línea de ejes

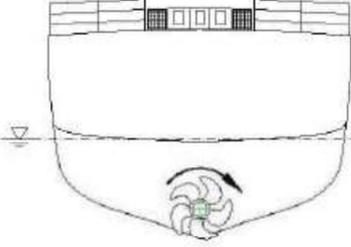
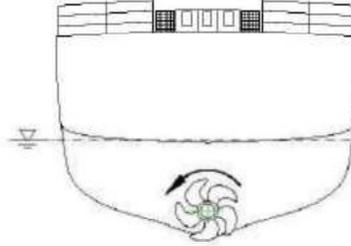
FPP (Hélice de paso fijo)
Sentido de giro: Dextrógiro

CPP (Hélice de palas orientables)
Sentido de giro: levógiro


Figura 28: Sentidos de giro del propulsor en buques con una línea de ejes

Tabla 4: Sentidos de giro del propulsor en buques con dos líneas de ejes

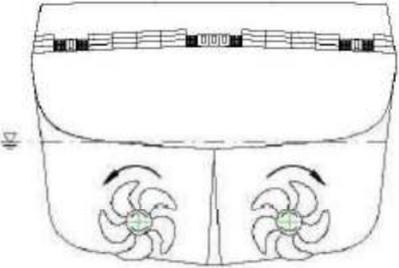
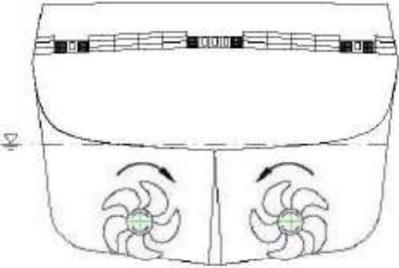
FPP (Hélices de paso fijo)	
Hélice de babor: levógiro	Hélice de estribor: dextrógiro
	
También llamado sentido de giro hacia afuera	
CPP (Hélices de palas orientables)	
Hélice de babor: levógiro	Hélice de estribor: dextrógiro
	
También llamado sentido de giro hacia adentro	

Figura 29: Sentidos de giro del propulsor en buques con dos líneas de ejes

RENDIMIENTO

Se ha detectado y comprobado que el giro presente en el campo de la estela, debido al flujo alrededor del buque, en el disco de la hélice puede conducir a un incremento en el rendimiento de la hélice cuando el sentido de giro de la misma es opuesto al sentido de giro del campo de la estela.

MANIOBRABILIDAD

En este apartado veremos las diferencias que hay en la maniobrabilidad al llevar una o dos hélices en el buque.

MANIOBRABILIDAD CON UNA HÉLICE

Para buques con una sola hélice, la influencia sobre la maniobrabilidad está determinada completamente por el efecto rueda de paletas. Cuando el buque está parado y la hélice comienza a moverse, la hélice moverá la parte posterior del buque en el sentido de giro. De esta forma, con una hélice de paso fijo, la dirección inicial del movimiento cambiará con el sentido de giro; por ejemplo, con empuje avante o atrás.

En el caso de hélices de palas orientables, el movimiento tenderá a ser unidireccional porque solamente cambia el paso (se mueve la pala) desde la posición de avante a ciar. El sentido de giro de la hélice no cambia nunca.

En la posición de empuje ciano, los dos tipos de hélices tienen el mismo sentido de giro y, suponiendo que estribor es el lado principal para atraque, existe clara ventaja para desatracar con empuje hacia atrás.

MANIOBRABILIDAD CON DOS HÉLICES

Además del efecto rueda de paletas, otras fuerzas debidas al efecto de la presión diferencial sobre el casco, y a la excentricidad del eje ejercen su influencia. La presión diferencial, debido al empuje inverso de la hélice de la otra banda da como consecuencia un empuje lateral y un par de giro.

Se puede deducir de las pruebas efectuadas que las hélices de paso fijo se comportan mejor cuando giran hacia fuera. Para las hélices de palas orientables no existe tal conclusión.

En estos tipos de motorización, durante la maniobra el par creado al moverse de manera diferente ambas hélices, la de babor en un sentido y la de estribor en sentido contrario, permite reducir el radio de giro. Al disponer de dos hélices, se producen dos efectos de paso de hélice, y para que uno anule al otro se hace que las dos hélices sean de paso contrario, una dextrógira y la otra levógira.

La mayoría de estos barcos llevan hélices supradivergentes (estribor dextrógira y babor levógira). Al contrario, se llaman hélices supraconvergentes. Están situadas equidistantes a la línea de crujía. Cuando los motores funcionan de manera independiente aumentan el tamaño de giro y refuerzan su acción. Su capacidad de maniobra es excelente tanto si se utilizan las dos hélices juntas como separadas. De esta forma tenemos que:

- El motor de babor en marcha avante desplaza la proa a estribor.
- El motor de estribor en marcha avante desplaza la proa a babor.
- El motor de babor en marcha atrás desplaza la popa a estribor.
- El motor de estribor en marcha atrás desplaza la popa a babor.

Por otra parte, dando marcha atrás con el motor de estribor y avante con el de babor (o viceversa), las hélices sumarán sus efectos y el barco ciabogará (girá) permaneciendo en el mismo lugar.

Esto no ocurre con las hélices supraconvergentes, ya que la suma se hará para evolucionar la popa del barco en dirección opuesta al desplazamiento deseado.

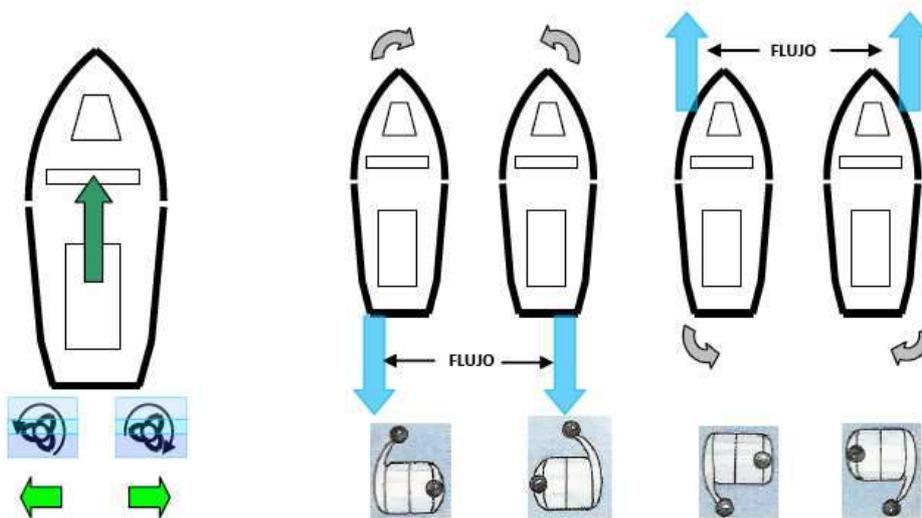


Figura 30: Maniobra con barco de dos hélices

SELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS

El número de palas varía, normalmente, de tres a siete. Para los buques mercantes se utilizan cuatro, cinco o seis palas, pese a que muchos remolcadores y buques pesqueros utilizan normalmente hélices con tres palas. En aplicaciones navales militares, donde el ruido generado es un factor muy importante, predominan hélices de cinco palas como mínimo.

El número de palas estará determinado, en primer lugar, por la necesidad de evitar frecuencias de resonancia perjudiciales para la estructura del buque, así como frecuencias de vibración torsional de la maquinaria. Dado que el número de palas aumenta los problemas de cavitación en la pala, puede aumentarse la raíz de la misma, con lo que el huelgo de pala llegará a ser menor.

También se ha demostrado que el rendimiento de la hélice y el diámetro óptimo aumentan a medida que disminuye el número de palas, y en alguna medida, la velocidad de la hélice dependerá del número de palas de la hélice.

DEFINICIONES

- Disco de hélice: Sección recta del cilindro circular circunscrito a la hélice.
- Área desarrollada de una pala: Área verdadera de la superficie activa.
- Área desarrollada de la hélice: Suma de las áreas desarrolladas de las palas.
- Área proyectada de la hélice: Área de la proyección de las palas sobre un plano perpendicular al eje.
- Relación del área proyectada: Cociente entre el área proyectada de la hélice y el área del disco.
- Relación del área desarrollada: Cociente entre el área desarrollada de la hélice y el área del disco.

PUNTOS MÁS IMPORTANTES DE UNA HÉLICE

DIÁMETRO

El diámetro es el círculo máximo que describen los extremos de las palas en su rotación. En una línea de hélice dada, el diámetro suele incrementarse en las hélices utilizadas en embarcaciones lentas y disminuye en las rápidas. Si todas las variables son constantes:

- El diámetro se incrementará cuando se aumente la potencia utilizada.
- El diámetro crecerá cuando las revoluciones por minuto de la hélice disminuyan (menor velocidad del motor y/o mayor reducción del engranaje).
- El diámetro debería incrementarse al aumentar la superficie de la hélice.

Si nos fijamos en la figura que viene a continuación, vemos las distancias de protección de la hélice, mirando el % del diámetro de la hélice.

1. Distancia mínima entre las puntas de las palas y el casco (**17%**)
2. Distancia mínima entre las puntas de las palas y la quilla (**4%**)
3. Distancia mínima entre el dormido de popa y la hélice a un 35% del diámetro de la hélice (**27%**)
4. Distancia máxima entre la hélice y el timón a un 35% del diámetro de la hélice (**10%**)
5. Distancia máxima al extremo del eje libre (**4 veces el diámetro del eje**)

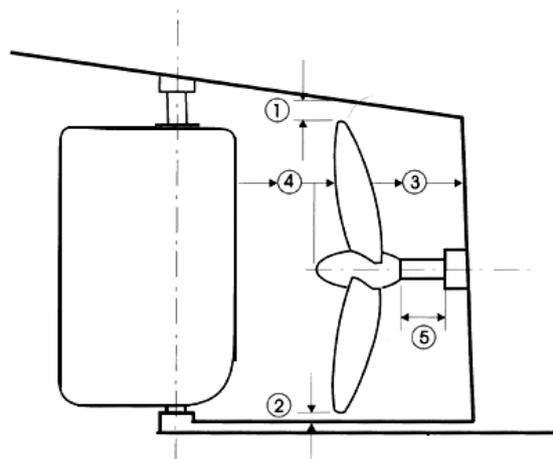


Figura 31: Distancias de protección de la hélice

Como conclusión:

- Las distancias a las puntas de las palas deben ser lo más pequeñas posibles dentro de las normas para que la hélice pueda ser lo más grande posible.
- La distancia entre la hélice y el timón debe ser pequeña para mantener el control de la dirección.
- La distancia entre el dormido de popa y la hélice debe ser grande.

A continuación veremos ejemplos de hélices mal instaladas por varios motivos.

1. Colocación de dispositivos que ocupan parte del vano de la hélice, sobre todo a proa de ésta, reduce la eficiencia y aumenta la vibración.



Figura 32: Ejemplo 1 de hélice mal instalada

2. Distancia demasiado pequeña entre el dormido de popa y la hélice.



Figura 33: Ejemplo 2 de hélice mal instalada

3. Distancia muy pequeña entre el casco y la punta de las palas.



Figura 34: Ejemplo 3 de hélice mal instalada

4. Deterioro de las puntas de las palas, ensuciamiento excesivo de la superficie del casco y el mal aprovechamiento del vano de la hélice debido a una mala instalación.



Figura 35: Ejemplo 4 de hélices mal instaladas (fotos de diferente ángulo)

PITCH

El pitch de una hélice es el desplazamiento que hace una hélice en un giro de 360° . El pitch es la distancia teórica que una hélice se movería a través del agua en cada revolución. Por ejemplo, si tenemos una hélice de 17 pulgadas de paso, está avanzará 43 cm (17 pulgadas) por cada vuelta completa asumiendo que no hay deslizamiento, es decir, en un medio sólido. En el agua, la hélice avanza con menos desplazamiento por culpa del deslizamiento.

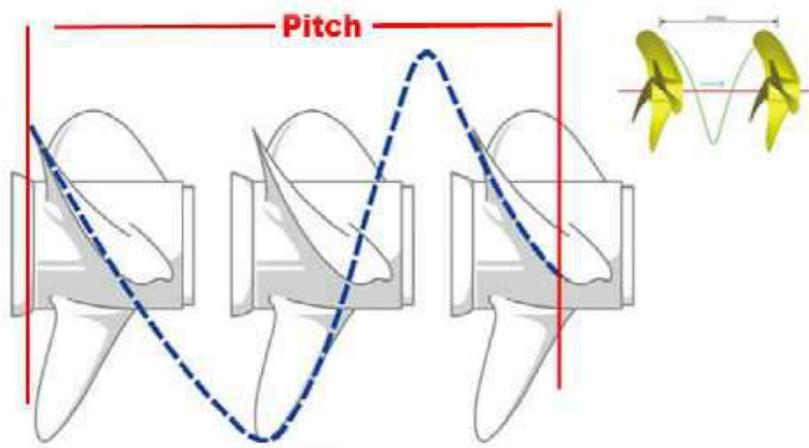


Figura 36: Pitch de la hélice

RAKE

El rake o el paso o la caída de la hélice es la curvatura o ángulo en que las palas toman de inclinación hacia delante o hacia atrás en relación con el eje propulsor. En la figura que tenemos a continuación tenemos dos ejemplos de diferente rake. Se representan casos distintos de paso menor y mayor.

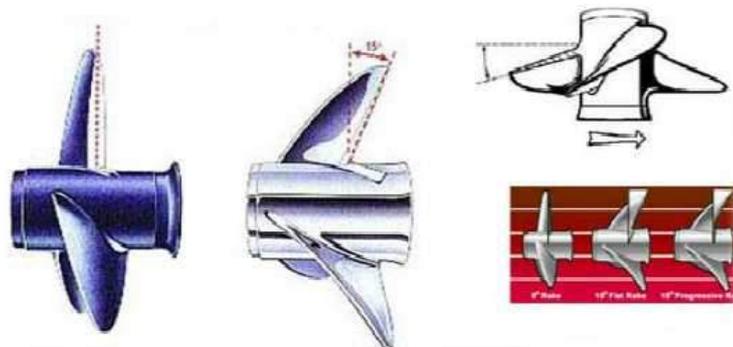


Figura 37: Rake de la hélice (1)

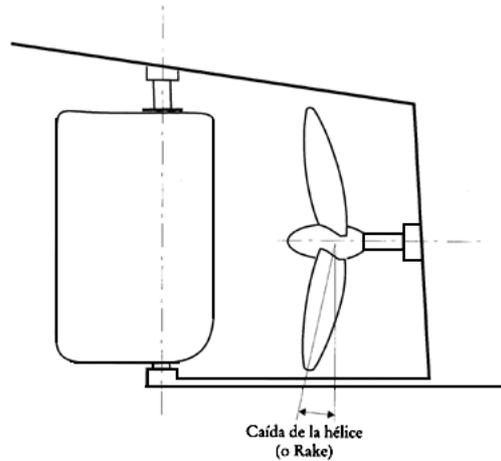


Figura 38: Rake de la hélice (2)

Desde el punto de vista del motor, la longitud y el rake afectan en su funcionamiento. Si la hélice tiene mayor paso (mayor resistencia), mayor será la cantidad de agua recogida por la superficie de la hélice y, en consecuencia, el motor perderá algunas revoluciones por minuto. En cambio, a menor paso (menor resistencia), menor será la cantidad de agua recogida por la hélice y el motor ganará revoluciones por minuto. El equilibrio está en buscar un paso adecuado en función de un número de vueltas del motor y una navegación ajustada, repercutiendo en el consumo de combustible y la velocidad de la embarcación.

En la imagen que tenemos a continuación, observamos el flujo de agua interceptado por las hélices (líneas de color rojo) de menor y mayor rake. A mayor rake, mayor cantidad de líneas de flujo de agua intercepta nuestra hélice, en consecuencia, mayor será la cantidad de agua que se ponga en movimiento.



Helice con menor paso recoge menos entrada de agua

Helice con mayor paso recoge mas entrada de agua

Figura 39: Diferentes flujos de agua con diferente rake

CUP

El cup de una hélice es una especie de taza en el borde de la salida del agua de la hélice con forma de cuchilla. El labio de esta curva en la salida de la hélice es la que le permite obtener un mejor corte en el agua. Todo esto provoca una reducción de la ventilación, más deslizamiento y permite una mejor salida de agua en muchos casos. Esta forma en la hélice también funciona bien cuando el motor se puede subir en el espejo de popa de manera que la hélice está cerca de la superficie del agua. Un buen cup suele dar lugar a mayor velocidad máxima en navegación.

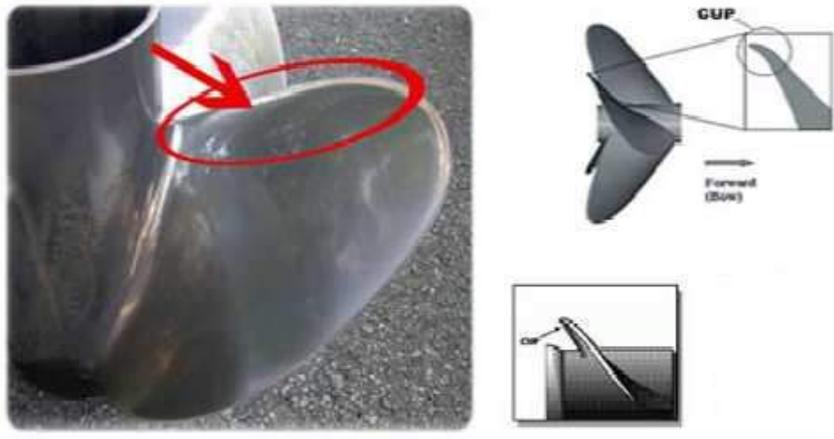


Figura 40: Cup de la hélice

PARÁMETROS PARA ESCOGER LA HÉLICE ADECUADA

Una embarcación no conseguirá un rendimiento óptimo para el uso que se le desee dar hasta que no se escoja la hélice adecuada para dicha embarcación. Esta hélice debe ser apropiada en diseño, tamaño y material.

SELECCIÓN DE LA HÉLICE CORRECTA

La hélice es el elemento propulsor de una embarcación equipada con motor. El tamaño y la forma adecuados de la hélice dependen de cada combinación de embarcación y motor.

El rango de revoluciones por minuto óptimo para cada motor se encuentra en el manual de la hélice que nos ofrece el fabricante. Este parámetro puede variar de unas marcas a otras en fueraborda, incluso para una misma potencia.

El objetivo en la selección de la hélice adecuada es maximizar el rendimiento de cada barco en navegación, al tiempo que el motor opera en rango de revoluciones por minuto recomendadas, sin sobrepasar el máximo y funcionando por encima del mínimo recomendado.

En el caso de que ya tengamos la hélice instalada y queramos saber si es la adecuada para la embarcación y el motor, nos debemos realizar las siguientes preguntas:

- ¿Es el rendimiento de la embarcación semejante al de otras de potencia y diseño similares?
- Respecto al estado de la obra viva:
 - o ¿cuándo se limpió y se pintó por última vez la embarcación?
 - o ¿en qué estado se encuentra la hélice?
 - o ¿está limpia e indemne y su superficie se mantiene lisa?
- ¿Qué potencia tiene el motor y en qué estado se encuentra?

La hélice puede ser inadecuada si:

- El motor no alcanza las revoluciones por minuto de diseño y se sobrecarga.
- El motor sobrepasa las revoluciones por minuto de diseño cuando funciona a toda marcha, sobre acelera y recibe una subcarga de combustible.

- La hélice está sobrecargada y muestra signos de cavitación y erosión superficial.

Se recomienda hacer un control preliminar. En el anexo IV se describe un método sencillo de estimación preliminar de los parámetros básicos de una hélice.

TAMAÑO

El tamaño de la hélice viene determinado por el diámetro y la altura de la hélice.

Diámetro

Círculo máximo que describen los extremos de las palas en su rotación: dos veces la distancia desde el núcleo hasta el extremo de la pala. Dependiendo de nuestro tipo de embarcación y su tamaño, escogeremos una hélice de mayor o menor diámetro.

Altura

La hélice debe estar sumergida para que opere correctamente. Según la teoría, hay que dejar una pulgada de distancia entre el plato anti - cavitación y la quilla del buque. Una instalación incorrecta en altura, puede producir daños.

CURVATURA

Muchas de las hélices actuales incorporan una curvatura añadida en el borde de la pala. Este labio le permite tener una mejor mordida en el agua, lo que conlleva a una reducción de la ventilación y resbalones, a la vez que permite una aceleración más rápida, lo que también se denomina como "*hole shot*". Estas hélices también rinden bien cuando se las hace trabajar cerca de la superficie del agua y proporcionan una velocidad final superior.

SENTIDO DE GIRO

Hélices dextrógiras y levógiras

Hélices dextrógiras o de paso a derecha: hélices que giran en sentido de las agujas del reloj vista desde popa y marcha avante.

Hélices levógiras o de paso a izquierdas: hélices que giran en sentido contrario de las agujas del reloj vista de popa y marcha avante.

Se escoge una u otra hélice dependiendo, en un principio, de cómo resulta más fácil la maniobra para entrada y salida de puerto y atraque y desatraque del muelle. Conociendo los puertos de destino del buque, se escogerá el tipo de hélice más adecuada que permite la facilidad a la hora de la maniobra.

PROBLEMAS A EVITAR

Ventilación

La ventilación se produce cuando el aire de superficie o los gases de escape se ven arrastrados por las palas de la hélice. Cuando esto sucede, la embarcación pierde velocidad y las revoluciones del motor suben rápidamente. Puede deberse al trazo de curvas muy cerradas, un motor montado muy alto en el espejo de popa o un exceso de trimado del motor.

Cavitación

La cavitación es un fenómeno de la vaporización de agua debido a la extrema reducción de la presión en la parte posterior de la pala de la hélice. Muchas hélices cavitan parcialmente durante su operación normal, pero la cavitación excesiva puede resultar en daños físicos a la superficie de la hoja debido al colapso de burbujas microscópicas en la hoja de la hélice. Puede haber muchas causas de la cavitación, como la selección incorrecta de la hélice respecto a las aplicaciones que se le va a dar, daño en la superficie de la hélice, etc.

PARTE II: EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN

GERMINACIÓN Y FASES

El hecho de que generar una burbuja en el seno de un fluido requiere una gran cantidad de energía local (el gradiente de presión líquido - burbuja es proporcional al inverso del radio de la burbuja) cuestiona el fenómeno de la cavitación. Sin embargo, se debe considerar que el medio fluido real presenta siempre puntos de nucleación, es decir, partículas en suspensión, suciedad u otros. Estos dan lugar a discontinuidades del medio y a superficies cóncavas que inducen la nucleación o germinación de las burbujas. Una vez esto ocurre, el crecimiento es inmediato hasta alcanzarse el equilibrio de presiones.

Una vez que se ha generado la burbuja, todo proceso de cavitación presenta dos fases claramente diferenciadas: el crecimiento de las burbujas y el colapso.

El crecimiento de las burbujas

El crecimiento aparece asociado a los puntos de germinación (discontinuidades). Puede ser lenta o rápida, según el mecanismo predominante que genere la cavitación. Si el líquido tiene un alto contenido en gas, el crecimiento es lento y se produce por difusión de vapor (cavitación gaseosa), mientras que si la cavitación se debe a la reducción brusca de la presión se denomina cavitación vaporosa y resulta ser un proceso muy rápido. Por lo tanto, el crecimiento es función de la formación inicial de las burbujas y de la presión exterior.

El colapso

Una vez formada la burbuja, puede ocurrir que cambien las condiciones del medio que la rodea y que la burbuja colapse. El colapso de una burbuja induce una onda de presión en el medio que la rodea. Localmente, los niveles de presión no son muy elevados pero sus efectos pueden ser catastróficos por actuar normalmente sobre superficies muy reducidas. El colapso es un fenómeno catastrófico en el que la burbuja disminuye drásticamente su tamaño. Por lo tanto, afecta de un modo no estacionario sobre la resistencia de los materiales donde colapse.

TIPOS DE CAVITACIÓN

Hay varios tipos de cavitación, los cuales se pueden clasificar según la forma en la que se produce, según el grado de desarrollo de la misma y según la morfología.



Figura 41: Aparición de burbujas de cavitación en las palas de una hélice

SEGÚN LA FORMA DE PRODUCIRSE

Cavitación de vapor

Es debida a la disminución local de la presión en el seno de un líquido. Ésta puede ser de dos tipos: hidrodinámica o acústica.

- Hidrodinámica: creada por depresiones locales debidas a la aceleración del fluido.
- Acústica: debida a ondas de presión transmitidas en el fluido.

Cavitación gaseosa

Es ocasionada por la introducción desde el exterior de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura, inducir vibración local de las partículas, etc.). Se puede llamar también cavitación óptica o cavitación de partículas.

SEGÚN EL GRADO DE DESARROLLO

Cavitación incipiente

Etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas.

Cavitación desarrollada

Se trata de una etapa en la que se tiene un número de burbujas lo suficientemente elevado como para producir una modificación del campo hidrodinámico.

Cavitación separada

Etapa final de la cavitación, cuando está próxima a desaparecer. Se produce normalmente en las zonas de estela, con una importancia menor a las anteriores.

Supercavitación

Cuando se tiene una superficie sólida sumergida, la cavitación se extiende ocupando en su totalidad dicha superficie. Aparece, por ejemplo, en las hélices de lanchas rápidas en las que las condiciones ante la cavitación son críticas.

Propulsar un cuerpo bajo el agua necesita gran cantidad de energía. Desplazándose rápidamente aún consume más energía, ya que la resistencia al avance del agua contra una superficie sumergida aumenta con la velocidad. Los ingenieros navales constantemente tratan de mejorar los cascos de los barcos con el objetivo de minimizar la fricción del agua.

Los científicos han encontrado una nueva forma de evitar la resistencia al avance del agua, lo que permite desplazarse a alta velocidad. La idea es minimizar la superficie húmeda del cuerpo en movimiento encerrándolo en una burbuja de gas de baja densidad.

La supercavitación es la versión extrema de la cavitación en la que se forma una única burbuja de manera que envuelve el objeto en desplazamiento casi por completo.

Un cuerpo con supercavitación tiene una resistencia extremadamente baja, porque la fricción sobre su superficie es casi inexistente. En lugar de estar rodeado de agua, se rodea del vapor del agua que se forma en la burbuja. Como el vapor tiene una densidad y viscosidad mucho menor que el agua líquida, el cuerpo puede avanzar mucho más rápido.

La supercavitación es difícil de obtener, el cuerpo que quiera usarla debe estar moviéndose a una gran velocidad: al menos 180 km/h, según algunos expertos. Esa velocidad es muy superior a la que se obtiene en cuerpos que actualmente se mueven en el agua. Por otra parte, la forma de la cabeza también tiene que ser diferente, debería ser chata. Así a grandes velocidades el fluido es forzado a moverse desde el borde de la cabeza con tanta velocidad, en un ángulo especial, que no toca la superficie del cuerpo.

Por eso, en un cuerpo supercavitatorio, solamente la cabeza causa una resistencia significativa ya que es la única parte que está en contacto real con el agua líquida. Sin embargo, estamos ante una paradoja: cuando más chata sea la cabeza, más alta será la resistencia. Es por eso que hay que conseguir un punto medio, y las mejores cabezas son las que están ligeramente curvadas.

El asunto es que la resistencia general se reduce enormemente una vez que se alcanza un régimen de supercavitación, y luego aumenta linealmente (no geométricamente) con la velocidad.

Los álabes de un rodete de la hélice de un barco se mueven dentro de un fluido, las áreas de bajas presiones se forman cuando el fluido se acelera a través de los álabes. Cuanto más rápido se mueven los álabes, menor es la presión alrededor de los mismos. Cuando se alcanza la presión de vapor, el fluido se vaporiza y forma pequeñas burbujas de vapor que al colapsarse, causan ondas de presión audibles y desgaste en los álabes.

SEGÚN SU MORFOLOGÍA

Cavitación de burbujas aisladas

En principio está influenciada por los componentes de distribución de presión, lo que causa alta presión de succión en la zona giratoria media de las palas. Como se manifiesta en esta zona, tiende a hacerlo en corrientes no separadas. Aparece como burbujas individuales de forma creciente bastante grandes que se contraen rápidamente en la superficie de la pala.

Este tipo de cavitación suele presentarse en la zona de máximo espesor de las secciones cilíndricas, donde se forman burbujas que colapsan violentamente. Es muy peligrosa debido a la erosión que puede ocasionar a las palas.

Su aparición es indicio de que la relación entre el espesor de la sección donde se presenta y su longitud es demasiado alta.

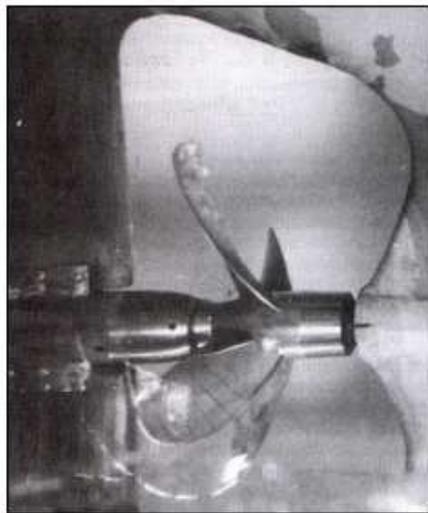


Figura 42: Cavitación de burbujas aisladas

Se consigue eliminar a través de modificaciones en la geometría de las secciones donde se presente, que disminuyan la relación espesor - longitud:

- Aumentando la relación área - disco, es decir, aumentando las secciones.
- Disminuyendo el espesor de las secciones, con lo cual es necesario utilizar un material de mayor resistencia mecánica.
- Reduciendo la curvatura de la línea media.

Cavitación de nube

Con frecuencia se encuentra detrás de cavidades de extensiones de agua muy desarrollada y estable. Y muchas veces, en corrientes moderadamente separadas en las cuales vórtices pequeños originan pequeñas cavidades.

Aparece cuando una gran superficie de la pala cavita en forma de burbuja. Este tipo de cavitación suele presentarse asociado a una cavitación de lámina, cuando el seno del flujo separado en el borde de entrada aparecen torbellinos de alta velocidad que originan pequeñas burbujas de vapor, y al restablecerse el flujo sobre la pala antes del borde de salida, estas burbujas pueden colapsar, dando lugar a fenómenos de erosión. Este tipo de cavitación encierra un grave peligro de erosión sobre la superficie de las palas y es necesario modificar su diseño para evitar su aparición.

Como solución se aumenta el diámetro de la hélice, disminuyendo así el paso y la relación área - disco.

Con esta medida se consigue que la cavitación se extienda hasta el borde de salida y, de esta forma, se elimina la erosión sobre las palas.



Figura 43: Cavitación de nube

Cavitación de lámina

Se genera en los bordes de entrada de las palas sobre la cara de succión de las mismas, lo cual tiene una incidencia positiva. Suele ser estable, aunque si llega a condiciones de inestabilidad puede dar lugar a fuertes tensiones.

Si los ángulos de incidencia se incrementan o el número de cavitaciones disminuye, el área de cavitación de la pala será mayor en el aspecto giratorio y radial. Como consecuencia, la cavitación forma una extensión de agua sobre la superficie de la pala cuya magnitud depende del diseño y las condiciones ambientales.

Este tipo de cavitación no encierra riesgos de erosión para las palas debido que las partes que cavitan están aisladas de la superficie de la hélice por un área de agua que no cavita y amortigua las implosiones, pero cuando se desarrolla con cierta extensión, puede ser origen de fluctuaciones de presión en el agua que se transmiten hasta la bovedilla del codaste originando vibraciones en la estructura del peak de popa.



Figura 44: Cavitación de lámina y de nube

Cavitación de vórtice

Ocurren tanto en punta como en cubo de las palas de las hélices. Aparecen en forma de tubos de vorticidad con aspecto de cordones en punta de cada una de las palas o en el centro de la hélice, respectivamente.

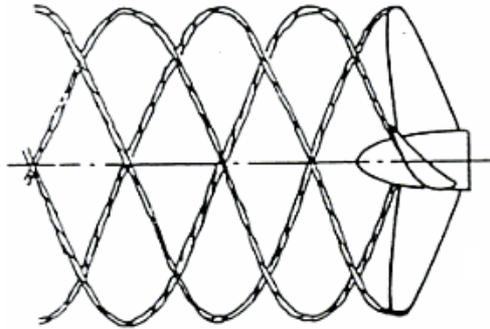


Figura 45: Cavitación de vórtice de punta

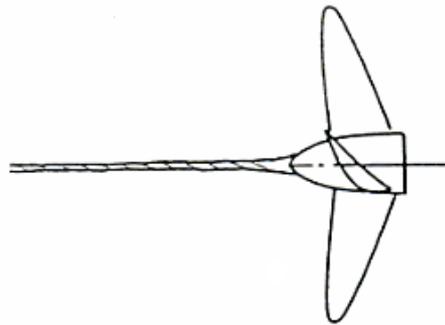


Figura 46: Cavitación de vórtice de cubo

Cavitación de estría

Tipo de cavitación de burbujas, en la que la nucleación de las mismas se produce siguiendo una línea.

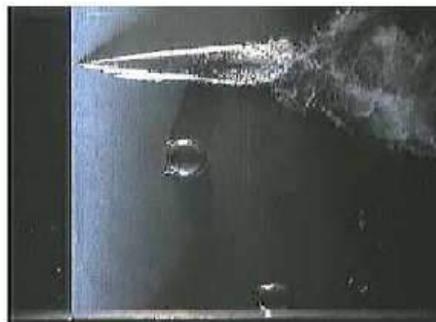


Figura 47: Cavitación de estría

Cavitación en torbellinos en el extremo de la pala

Se observa a cierta distancia de las extremidades de las palas de la hélice. En ese momento, se les considera separadas, pero a medida que se vuelven más fuertes, ya sea por la carga o presión en la parte más alta de la pala o disminución del número de cavitaciones, se mueve en dirección al extremo de la pala y queda adherida a ella de forma eventual.

Debido a la diferencia de presión entre las caras de presión y de succión en la punta de las palas el flujo tiende a cruzarse originando un torbellino en cuyo seno pueden producirse altas velocidades y, por lo tanto, facilitar la formación de burbujas de cavitación. Primero se observa el remolino, después la punta que cavita y finalmente queda fijada en la pala cavitando los dos.

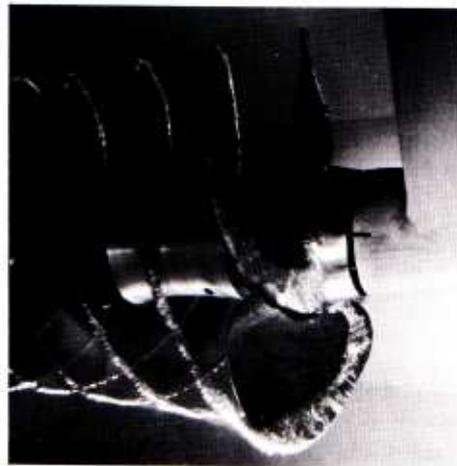


Figura 48: Cavitación en torbellinos en el extremo de la pala

Este tipo de cavitación produce erosión, y se elimina reduciendo el paso geométrico de las secciones, lo que disminuye la diferencia de presión entre ambas caras.

Cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice - codaste

Se origina desde la punta de la pala cuando pasa por su posición más elevada y se dirige hacia el codaste debido a la aparición de un torbellino.

Es responsable de la aparición de vibraciones en la zona del codaste donde hay habitabilidad (superestructura a popa).

La hélice expuesta a una carga se queda sin agua debido a la presencia de la superficie del casco por encima. Para evitar esta falta de agua, la hélice se esfuerza por conseguir agua en la popa, lo cual conlleva a la formación de una trayectoria de flujo inactivo desde el casco hasta el disco de la hélice. La cavitación se forma debido a una turbulencia y a otras alteraciones de flujo próximas al casco, causando una rotación en el punto de estancamiento.

Cavitación en torbellinos producidos por interacción hélice - hélice

Las maniobras generan complejas interacciones entre las estructuras de cavitación y la pala de la hélice, así como entre la hélice y el casco, y entre hélices del mismo barco. En un buque con dos hélices que opera a alta velocidad, al realizar maniobras en el puerto se detecta una interacción entre las hélices. Ésta adopta la forma de un vórtice vertical desde una de las palas que interactúa con las estructuras de la cavidad de las palas de la otra hélice.

Los vórtices se van moviendo hasta que se condensan y una gran nubosidad coaxial los envuelve, haciéndolos inestables. Debido a la interacción de los vórtices, se forma un camino en forma de espiral.

En la zona de la raíz, la cavidad laminar se convierte en una estructura gruesa y compleja de naturaleza más nebulosa con estructuras de vórtices fijados a la misma. Este tipo de estructuras de cavitación de la raíz son extremadamente agresivas en erosión sobre las palas.

Cavitación en torbellinos originados por el núcleo del propulsor

Se produce en hélices con núcleos de gran curvatura en la dirección del flujo. El desprendimiento de flujo puede ser suficientemente violento para que se inicie cavitación. Suele ser muy estable.

Cavitación en la cara de presión

Se presenta cuando en una sección cilíndrica el flujo incide con un ángulo de ataque negativo y, de esta manera, la cara de presión pasa a trabajar como cara de succión.

Se considera una cavitación peligrosa debido a la erosión que puede causar en las palas. Se puede eliminar aumentando el paso de la sección correspondiente, con lo que el ángulo de ataque se mantiene siempre positivo. También se puede reducir su aparición si el perfil tiene aristas más redondeadas.



Figura 49: Cavitación en la cara de presión

Cavitación por rayas

Forma rayas relativamente finas que se extienden de forma giratoria desde la región de la superficie de la pala pasando por todas las palas de la hélice.

OTROS TIPOS DE CAVITACIÓN

Cavitación por exceso de revoluciones por minuto

Si la velocidad de giro tangencial en la punta de las aspas sobrepasa los 150 pies por segundo (pps) en hélices de cinco aspas y 175 pps en hélices entre dos y cuatro aspas, y 100 pps en hélices en tobera; el agua expulsada lleva tal fuerza que impide que el vacío formado no pueda ser ocupado por otras moléculas de agua. De esta forma se produce la cavitación por velocidad tangencial o por exceso de revoluciones por minuto. Esta erosión siempre se presenta en la punta de las aspas.

Cavitación por falta de área en aspas

Si la presión en el aspa es superior a 7 psi (unidad de presión básica) en hélices libres y 8.5 psi en hélices con tobera se produce la cavitación por falta de área. El origen de las burbujas está en el borde de ataque de las aspas de la hélice, pero el daño se manifiesta en la parte posterior con el aspecto de una corrosión y/o erosión que puede ir retrocediendo en su proceso destructivo hasta el centro del aspa.

La erosión producida por cualquier tipo de cavitación se manifestará con mayor intensidad cuando la protección catódica no es la adecuada. Y en casos extremos la hélice se llega a consumir por completo en días o semanas.

Cuando se diseña una hélice es muy importante observar la relación diámetro contra las revoluciones por minuto para no alcanzar las velocidades tangenciales donde se producirá la cavitación por exceso de revoluciones por minuto, y asimismo, la relación diámetro - área de aspas para evitar la cavitación por falta de área en aspas.

Finalmente, cualquier tipo de cavitación reducirá la eficiencia de la embarcación incrementando los costos de combustible y reparación o reemplazo de la hélice erosionada.

EFFECTOS Y CONSECUENCIAS

BLOQUEO

La aparición de burbujas hace que la sección de paso del flujo disminuya. Este hecho hace que el flujo se acelere y, por lo tanto, la presión disminuya más todavía.

PÉRDIDA DE PRESTACIONES

Uno de los efectos estáticos más negativos de la cavitación es la pérdida de prestaciones. La curva característica en la que aparece cavitación cae bruscamente a altos caudales.

PÉRDIDA DE RENDIMIENTO

La cavitación merma el rendimiento mecánico de los sistemas. En una hélice de barco, la aparición de estas burbujas de aire despegan del contacto del agua alrededor de la hélice, disminuyendo de forma considerable su eficiencia.

VIBRACIONES Y RUIDO

El continuo colapso de las burbujas de cavitación produce un fenómeno vibratorio que se transmite a través de los conductos o estructura y produce molestas oscilaciones y ruidos, especialmente peligrosos si la frecuencia es asociada con el fenómeno de la cavitación entra en resonancia con alguna frecuencia propia de la estructura.

EROSIÓN

Es el efecto más indeseado de la cavitación. Los álabes, sometidos a un continuo proceso de colapso de las burbujas en su proximidad, acaban teniendo problemas serios de desgaste, que pueden terminar con el álabe y, por lo tanto, con las prestaciones de la hélice.

DETERIORO

Las implosiones cercanas a los elementos metálicos provocan, con el tiempo, el deterioro de las superficies.



Figura 50: Álabes deteriorados debido a la cavitación

DAÑO POR CAVITACIÓN

El daño por cavitación es una forma especial de corrosión - erosión debido a la formación y al colapso de burbujas de vapor en un líquido cerca de una superficie metálica, la hélice. Sobre ésta se encuentran líquidos de alta velocidad con cambios de presión.

Un daño por cavitación tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación. El daño por cavitación se atribuye parcialmente a efectos de desgaste mecánico. La corrosión interviene cuando el colapso de la burbuja destruye la película protectora con los pasos siguientes:

1. Se forma una burbuja de cavitación sobre la película protectora.
2. El colapso de la burbuja causa la destrucción local de la película.
3. La superficie no protegida del metal está expuesta al medio corrosivo y se forma una nueva película por medio de una reacción de corrosión.
4. Se forma una nueva burbuja en el mismo lugar, debido al aumento de poder nucleante de la superficie irregular.
5. El colapso de la nueva burbuja destruye otra vez la película.

6. La película se forma de nuevo y el proceso se repite indefinidamente hasta formar huecos bastante profundos.

El mecanismo anterior también funciona sin la presencia de una película protectora, ya que la implosión de la burbuja ya es suficiente para deformar el metal plásticamente y arrancarle pedazos de material.

Se acepta que la cavitación es un fenómeno de corrosión - erosión.

Es posible prevenir el daño por cavitación con los siguientes métodos de prevención de corrosión - erosión:

- Modificar el diseño para minimizar las diferencias de presión hidráulica en el flujo de medio corrosivo.
- Seleccionar materiales con mayor resistencia a la cavitación.
- Dar un acabado de pulido a la superficie sujeta a efectos de cavitación, ya que es más difícil nuclear burbujas sobre una superficie muy plana.
- Recubrimiento con hules o plásticos que absorben las energías de choque.

La formación y el aplastamiento de un gran número de burbujas en una superficie dan lugar a esfuerzos locales muy intensos, que parecen dañar la superficie por fatiga.

La protección contra la cavitación debe comenzar con un diseño hidráulico adecuado del sistema, de tal manera que se eviten en lo posible las presiones bajas. Cuando sea inevitable la presencia de la cavitación, el efecto sobre las superficies se puede reducir mediante el recubrimiento de materiales especiales de alta resistencia. El uso de pequeñas cantidades de aire introducidas en el agua reduce notablemente el daño causado por la cavitación. La protección catódica puede ser útil contra los efectos de la cavitación.

El efecto de la cavitación produce tres efectos: disminuye la eficacia, daña los conductos para el escurrimiento y produce ruido y vibraciones molestas. Los álabes curvos son susceptibles a la cavitación en su cara convexa, donde se pueden tener áreas sujetas a un picado fuerte o a falla total.

LUGARES DE APARICIÓN

La cavitación aparece en cualquier posición de la hélice donde la presión disminuya por debajo de la presión de vapor.

Normalmente, esta presión estará ubicada en la cara anterior de la hélice, es decir, la más situada a proa.

En las imágenes que vemos a continuación, podemos fijarnos en la formación de las cavidades que aparecen a partir de las palas de la hélice. Sabemos, que esta formación de burbujas aparecen por excesiva velocidad del buque o por el giro demasiado rápido de la hélice.

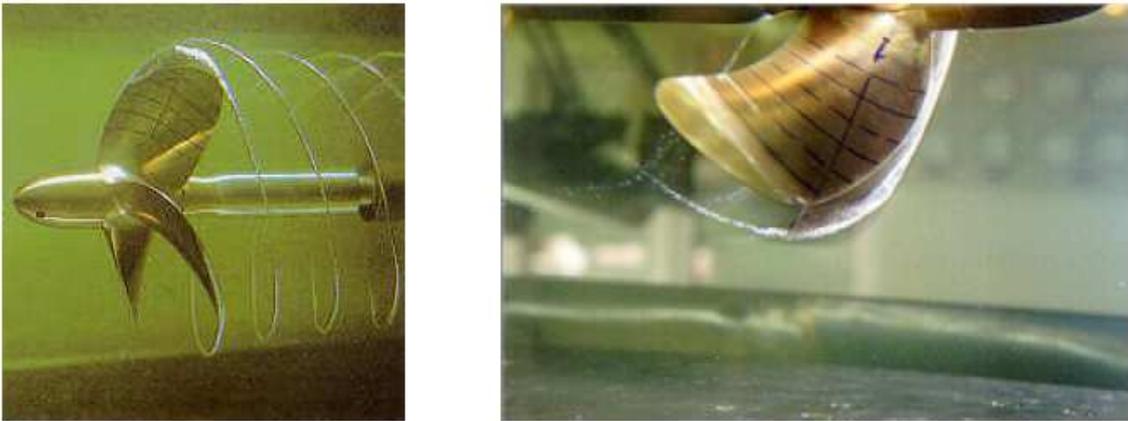


Figura 51: Imagen global y detallada de cavitación

TÉCNICAS DE DETECCIÓN

Dadas las características del fenómeno, se puede comprobar fácilmente la aparición de la cavitación. Las vibraciones y el ruido generados alertan sobre la presencia de dicho fenómeno. Sin embargo, se busca definir el punto exacto de la aparición del problema. Para ello, se pueden seguir dos métodos: caída en las prestaciones y medición del ruido generado.

CAÍDA EN LAS PRESTACIONES

Observando las prestaciones de una hélice, ya sea el rendimiento, la capacidad de giro, etc., se puede observar la aparición de cavitación cuando estas prestaciones varíen un determinado porcentaje sin modificar el punto de funcionamiento de la misma. Para detectar la cavitación se utilizan unos criterios que nos indican el límite de la precisión de la hélice y el deterioro de las palas funcionando con esa condición de cavitación.

MEDICIÓN DEL RUIDO GENERADO

Por medio de mediciones acústicas también se puede detectar la aparición de cavitación. Aquí aparece un brusco incremento en los niveles de ruido que se obtienen. Este ruido generado es debido al mal funcionamiento de la hélice.

PRUEBAS DE MAR EN EL TÚNEL DE CAVITACIÓN

En este último apartado del trabajo, veremos tres diferentes pruebas de cavitación en las hélices. Comprobaremos estudios reales sobre ensayos realizados en diferentes hélices.

Primero, el estudio realizado de la cavitación en hélices en timón - tobera y su influencia del ángulo de giro en el buque arrastrero Urabain.

Posteriormente, el análisis del flujo en una hélice marina. En dicho apartado veremos cuáles son los puntos de la hélice donde tiene más presión y como le afecta.

Finalmente, el estudio sobre los pulsos de presión debidos a la cavitación y la influencia de la separación entre la hélice y el casco.

Estos ensayos y estudios ya realizados sobre la cavitación en las hélices nos proporcionarán nuevos conocimientos y conclusiones sobre la hélice. Estos ejemplos finales serán el punto final al trabajo realizado sobre las hélices marinas y el fenómeno de la cavitación.

El túnel de cavitación del CEHIPAR es la instalación que se utiliza para optimizar el diseño de hélices comprobando y estudiando la generación de cavitación, riesgo de erosión, fluctuaciones de presión y la producción de ruidos inherente a la cavitación. Los ensayos pueden realizarse con el propulsor en flujo libre o simulando la estela del buque con mallas o introduciendo una réplica del modelo.

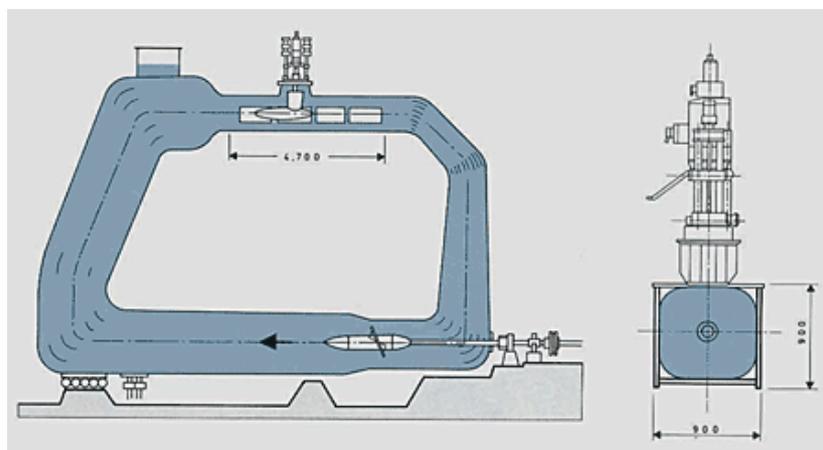


Figura 52: Túnel de Cavitación del CEHIPAR

CASO 1. CAVITACIÓN EN HÉLICES EN TIMÓN - TOBERA

Influencia del ángulo de giro

En los buques con timón - tobera se detectaron problemas de vibraciones para valores altos del ángulo de giro del timón - tobera. Debido a su relación con el fenómeno de la cavitación, se ha estudiado en el Túnel de Cavitación de El Pardo el comportamiento de una hélice en un timón - tobera para diferentes ángulos de giro.

Introducción

Desde un punto de vista hidrodinámico, la incorporación de una tobera tiene muchas ventajas sobre el equipo propulsor de un buque que utilice hélices muy cargadas. Esta mejora es debido al empuje adicional conseguido gracias a la acción ejercida por el campo de presiones que rodea a la tobera, sin necesidad de incrementar la potencia útil entregada a la hélice.

La adopción de una tobera es aconsejable en el aspecto propulsivo y en el de maniobrabilidad. En el caso de timón - tobera, las condiciones evolutivas del buque incrementan. Según Caldwell, aunque el par necesario en la mecha del timón - tobera es superior al de un timón convencional equivalente, la fuerza lateral que se consigue con el primero es casi el doble que la conseguida con el segundo.

Debido a la facilidad de respuesta del timón - tobera, el tiempo necesario para meter toda la caña de una banda a otra será inferior a doce segundos. Además, el equipo montado debe ser capaz de admitir una sobrecarga del 40% al iniciar el movimiento.

La adopción de una tobera supone una mayor homogeneidad del flujo incidente al disco de la hélice, lo que hace que las tensiones actuantes en las palas sean más uniformes y de menor entidad que en el propulsor convencional.

Dado que normalmente las vibraciones inducidas por el propulsor son causadas principalmente por pequeñas perturbaciones o vibraciones en las componentes de la estela, queda claro la necesidad de proyectar el sistema tobera - propulsor, adaptándolo a la estela propia del buque.

Planteamiento del problema

Cuando un buque pesquero de arrastre se encuentra faenando es muy difícil lograr que el aparejo salga directo desde su popa. Debido a las condiciones meteorológicas (viento, olas y corrientes), el buque tiende a seguir trayectorias diferentes a las del aparejo, ya que los abatimientos de ambos son distintos. Por esta causa, es necesario que el buque vaya gobernado continuamente metiendo ángulos de timón a la banda conveniente. Si el buque tiene timón - tobera, casi nunca irá a la vía durante la operación de pesca.

Es evidente que el sistema tobera - hélice se aparta de sus condiciones teóricas de funcionamiento, ya que la hélice no ocupa el plano central de la tobera y el flujo que llega al disco de aquélla es perturbado muy acusadamente por los mismos costados de la tobera, que se encuentra girada. En esta situación, la uniformidad característica de la estela en la tobera se rompe, pudiendo llegar a tener consecuencias graves, ya que da lugar a fuertes vibraciones en el buque inducidas por la hélice, y si su frecuencia se aproxima a la del casco, pueden producirse fuertes amplitudes que pueden averiar los aparatos de navegación.

Durante las pruebas oficiales del buque arrastrero Urabain se produjeron fuertes vibraciones en la zona de popa para ángulos del timón - tobera superiores a 20° . A raíz de esto, el armador y los constructores solicitaron los servicios técnicos de la sociedad clasificadora para que realizaran medidas de los niveles vibratorios.

Según las conclusiones de la sociedad de clasificación, las vibraciones detectadas no alcanzan niveles de peligrosidad. Sin embargo, se apreciaba que en condiciones extremas de funcionamiento (tobera girada más de 20°) aparecen ruidos y golpes en la tobera y en la hélice. Estos golpes se producen de forma intermitente y son atribuidos a fenómenos de cavitación provocados por el funcionamiento del conjunto tobera - hélice en condiciones de flujo asimétrico cuando se mete toda la caña a una banda.

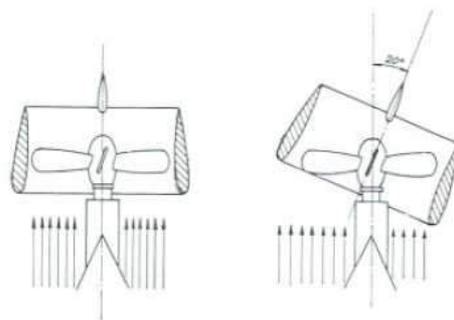


Figura 53: Tobera girada

Por otra parte, la intermitencia de los choques les hace suponer que la cavitación no es de carácter permanente, aunque no descartan que la posibilidad de que aquella provoque erosiones importantes, tanto en la tobera como en la hélice.

Se intentó abortar el problema con un sistema de anillos de torbellinos, pero los cálculos para evitar el problema se complicaban. Al girar el timón - tobera, las fluctuaciones de presión serán en función del tiempo de las posiciones de las palas y en la velocidad angular de giro de la caña.

Por ello, se estudió el problema desde un punto de vista experimental, utilizando el Canal convencional y, fundamentalmente, el Túnel de Cavitación.

Programa de trabajo

El programa consistió en:

1. Construcción de mallas apropiadas para simular la estela del buque Urabain.
2. Proyecto y construcción de un dispositivo que permitiese el giro del timón - tobera en el Túnel de Cavitación.

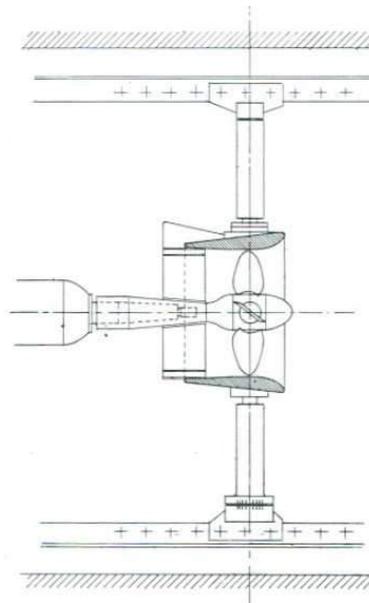


Figura 54: Montaje del timón - tobera en el Túnel de Cavitación

3. Realización de ensayos de cavitación de la hélice en timón-tobera para la condición de navegación libre, con el timón a la vía y para 15° , 20° y 25° de ángulo de caña, tanto a babor como a estribor.

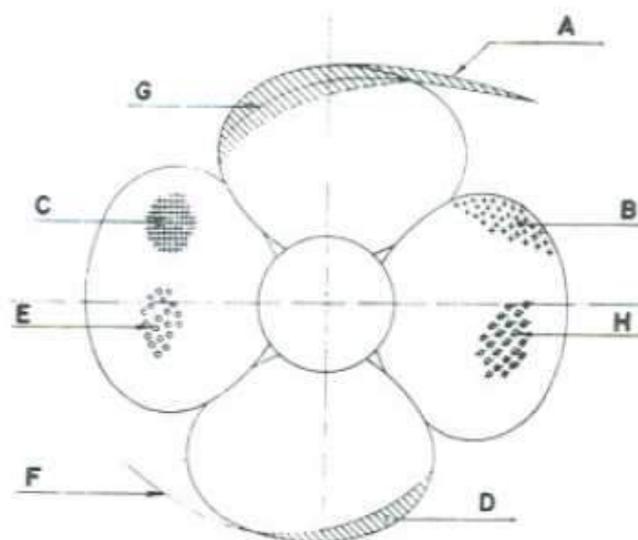
La fijación de las condiciones de trabajo de la hélice durante los ensayos se hizo a partir de la suposición de que la maniobra se realiza sin modificar las revoluciones por minuto del motor. Asimismo se supone que la velocidad varía desde el instante inicial de la maniobra, en que la velocidad sería la del buque con el timón a la vía, hasta un mínimo que dependería del ángulo de caña. Se ha supuesto que para una maniobra con un ángulo de caña de 20° , la velocidad final de la maniobra sería sólo el 80% de la velocidad inicial.

Realizando ensayos para esas dos velocidades extremas, inicial y final, se tendría una imagen de los fenómenos que pudieran ocurrir durante la maniobra. Al realizarse los ensayos a diferentes velocidades, se obtuvieron prácticamente los mismos resultados, y, posteriormente, se decidió efectuar los ensayos únicamente con la velocidad inicial.

Los valores correspondientes para cada condición fueron obtenidos de los ensayos de autopropulsión, propulsor aislado y estela, realizados con anterioridad a los ensayos de cavitación.

Resultados de los ensayos

Tabla 5: Representación esquemática de los fenómenos de cavitación



- A. Torbellino grueso de punta de pala o de núcleo
- B. Cavitación tipo foaming
- C. Cavitación tipo nube
- D. Cavitación lámina estacionaria
- E. Cavitación burbuja
- F. Torbellino fino de punta de pala o núcleo
- G. Cavitación lámina intermitente
- H. Manchas de cavitación de lámina, próximo a cavitación de burbuja.

1. Los fenómenos son muy inestables y su extensión muy variable. Pueden observarse condiciones en las que, a lo largo de una revolución, la pala pasa por posiciones donde está prácticamente libre de cavitación a otras en que prácticamente está cubierta. Para una misma posición también es muy variable la extensión e incluso el tipo de fenómeno.

En la posición de 0° para los ángulos de caña de 15° , 20° y 25° a babor, a veces está llena de cavitación en más de su mitad, desapareciendo en ocasiones. A veces es lámina y en otras una zona llena de burbujas.

2. A medida que se va metiendo caña a una banda se va acentuando la desigualdad de los fenómenos a lo largo de la circunferencia de giro de la hélice.

Cuando se mete la caña a babor aumenta la cavitación en la zona comprendida entre 0° y 180° y disminuye de 180° a 360° . Ocurre todo lo contrario cuando se mete la caña a estribor, disminuyendo de 0° a 180° y aumentando de 180° a 360° .

3. Progresivo empeoramiento en las condiciones de funcionamiento de la hélice a medida que aumenta el ángulo de caña. A 25° son tan fuertes los fenómenos observados que, aparte de las vibraciones, ruidos, etc., hay un gran peligro de rotura de las palas por erosión en el caso de que dicha situación se prolongase.

4. Los fenómenos son más intensos y peligrosos con la tobera a babor que cuando se hace girar a estribor.

5. La cavitación observada en el timón es de suma importancia. Con el timón a la vía podían observarse inicios de cavitación junto al borde de entrada del perfil de la cara de estribor, en la mitad superior.

A medida que se iba metiendo caña iba aumentando la cavitación sobre el timón, llegando en 25° a cubrir más de la mitad de la cuerda.

Cuando se metía la caña a babor, aumentaba la cavitación en la cara de estribor, y viceversa.

La cavitación observada en el perfil del timón era muy variable con la posición de las palas, variando en extensión y en intensidad.

6. La pieza de sujeción del timón daba lugar a un choque del fluido contra ella que originaba una cavitación muy fuerte, que se extendía sobre el timón. El tipo de fenómeno observado induce a pensar en un gran riesgo de rotura de esta pieza y, por lo tanto, de la seguridad del timón.

Ensayos de cavitación

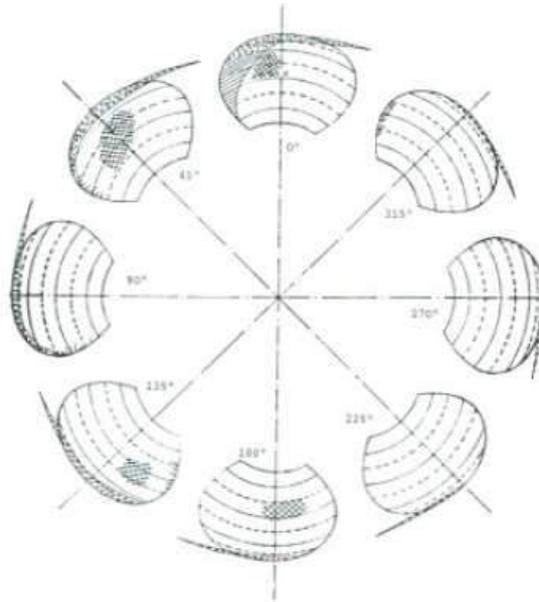


Figura 55: Ensayo 1. Condición 0°

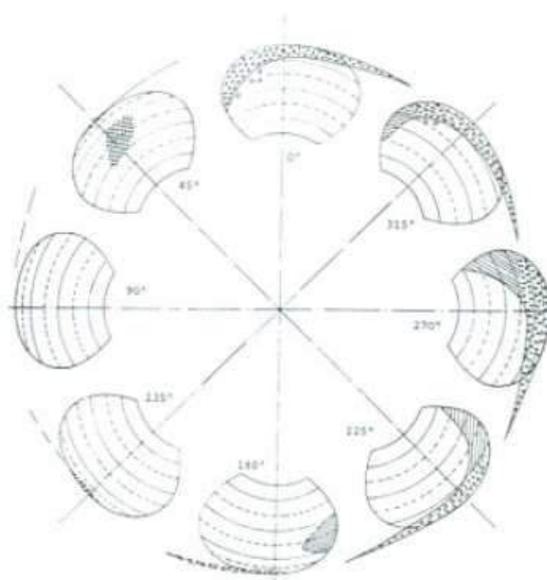


Figura 56: Ensayo 2. Condición 15° estribor

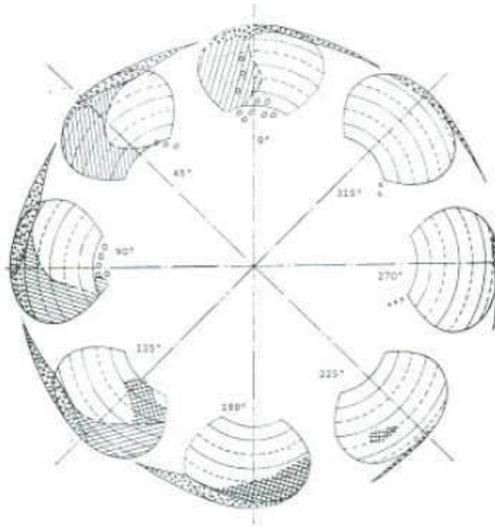


Figura 57: Ensayo 3. Condición 15º babor

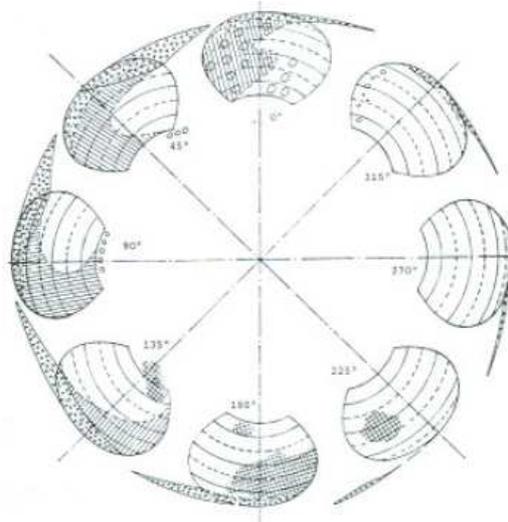


Figura 58: Ensayo 4. Condición 20º babor

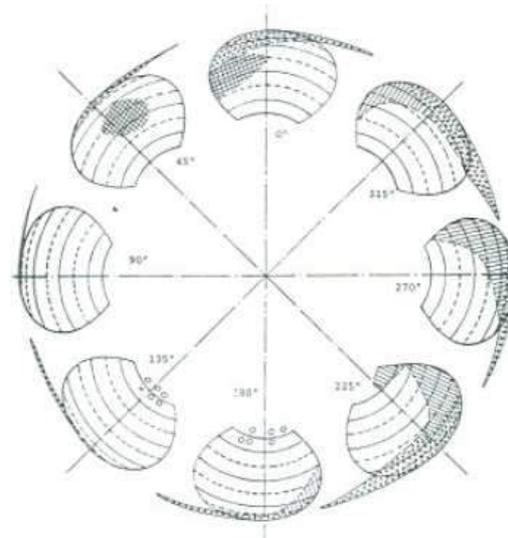


Figura 59: Ensayo 5. Condición 20º estribor

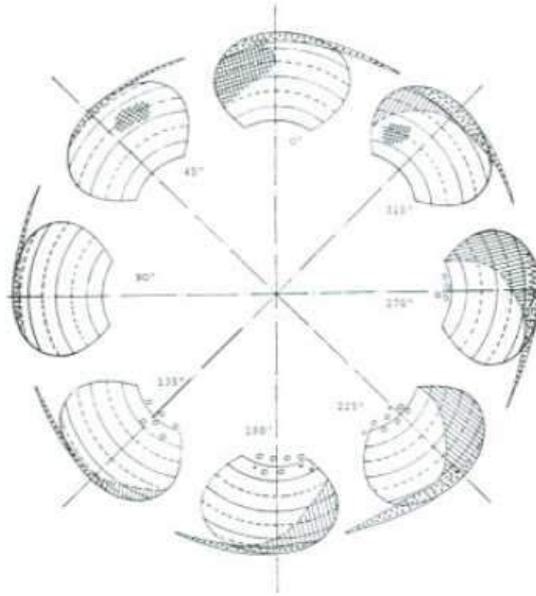


Figura 60: Ensayo 6. Condición 25º estribor

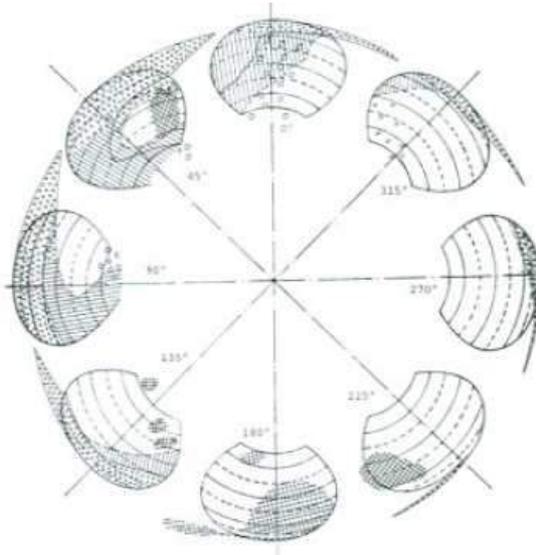


Figura 61: Ensayo 7. Condición 25º babor

Consideraciones finales

1. Los fenómenos observados aumentan con el ángulo de caña. La cavitación que aparece presenta grandes vibraciones, ruidos, fuertes erosiones de la hélice, de la tobera o incluso del timón, que en algún caso puede originar la rotura de dichos elementos.
2. La característica fundamental de la cavitación que se presenta es su inestabilidad. Se ha podido observar en todos los ensayos realizados que el fenómeno se presenta de forma intermitente, variando continuamente su extensión e incluso el tipo de cavitación. Esta variabilidad del fenómeno supone, con independencia del peligro de erosión en las palas y en la tobera, un gran riesgo de vibraciones de frecuencias muy diversas, con el consiguiente peligro de que puedan surgir fenómenos de resonancia con las frecuencias de vibración propias de los distintos elementos del buque.
3. En los proyectos de timón - tobera realizados en el Túnel de Cavitación se recomienda que el ángulo de giro del timón - tobera no exceda nunca de 20° , ya que se consiguen los mismos efectos a los de un timón convencional que pueda girar hasta 35° .

CASO 2. ANÁLISIS DEL FLUJO EN UNA HÉLICE MARINA

En este ensayo veremos el diagrama del propulsor de una hélice marina, obtenidas de forma experimental y por medio de técnicas de simulación numérica del flujo alrededor de una hélice. Para este ensayo, se utiliza un modelo de hélice a escala reducida.

Introducción

Los ensayos de propulsor aislado (*open water test*) permiten definir las características del funcionamiento de una hélice dada en un túnel hidrodinámico.

A partir de las resoluciones numéricas en las ecuaciones de Navier - Stokes promediadas en esfuerzos de Reynolds para flujo tridimensional necesario se obtienen coeficientes adimensionales habituales en el estudio de las hélices.

La validación del modelo desarrollado a partir de las medidas con técnicas extensiométricas permite el estudio de variables fluidodinámicas alrededor de la hélice, como los campos de presión, velocidades, etc.

No nos centraremos en los cálculos para obtener dichos coeficientes, sino que veremos cómo es afectada la hélice por las variables fluidodinámicas a las que está sometida la hélice.

Descripción del banco de ensayos y medidas realizadas

El banco de ensayos consta de un tanque de agua de 100 m³ donde se pueden instalar hélices de hasta 500 mm, accionadas por un motor de 50 kW a través de un conjunto caja de cambios - cardan, permitiendo velocidades de 150 a 1500 revoluciones por minuto.



Figura 62: Hélice marina en el banco de ensayos

Se emplea una hélice de tres palas. Con el objetivo de medir el par y el empuje se instrumenta su eje con un conjunto de galgas extensiométricas. La cadena de medidas utilizada tiene un nivel de confianza del 95%. La calibración de las galgas se hizo construyendo un equipo auxiliar.

Resultados del ensayo

A partir de los ensayos realizados y con los valores obtenidos en los cálculos, podemos saber que:

1. La máxima potencia se obtiene para el empuje mayor.
2. La potencia menor se obtiene cuando el empuje es mínimo y la velocidad de avance máxima.
3. Para el par, el empuje y el rendimiento se obtienen valores y tendencias similares.

3.1 Para el empuje, las mayores diferencias aparecen a bajos números de avance.

3.2 Para el rendimiento, las mayores diferencias aparecen para el avance nominal.

4. En la realización de ensayos a distintas velocidades de giro, los valores obtenidos para el par y el empuje fueron muy parecidos.
5. La presión estática del fluido debe disminuir de forma continua hasta alcanzar la sección de la hélice, momento en el que se debe presentar un pico importante para luego tender hacia la presión del flujo sin perturbar.
6. En los estudios del flujo alrededor de la hélice se observa:

6.1 Se muestran los contornos de presión estática en la superficie de los álabes y los de velocidad en las proximidades de la hélice.

6.2 La presión es máxima en la proximidad del borde de entrada de los álabes y para posiciones radiales cercanas al cubo.

6.3 Se observa un pico en la velocidad del flujo en las proximidades de los álabes y la zona de influencia de la hélice.

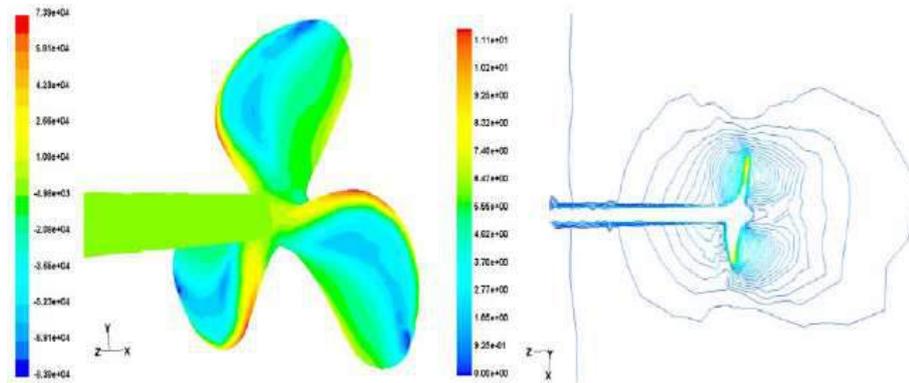


Figura 63: Contornos de presión estática y de velocidad

Consideraciones finales

La comparación de resultados para el diagrama de propulsor aislado y los esfuerzos de par y empuje indica una gran coincidencia en cuanto a dichas características estáticas para la hélice utilizada en el ensayo.

Se ha llevado a cabo medidas en ejes de hélice de escala real, que permite completar el desarrollo de ambas técnicas y sirven como punto de partida para la obtención de variables dinámicas mediante el estudio del comportamiento no estacionario del flujo alrededor de una hélice dada.

CASO 3. PULSOS DE PRESIÓN DEBIDOS A CAVITACIÓN

Influencia de la separación entre la hélice y el casco

Con la instalación de elevadas potencias en los buques actuales para proporcionarles mayores velocidades, los efectos que se derivan de los fenómenos de cavitación son cada vez más importantes. Los altos empujes producidos por el propulsor, el uso del eje inclinado en muchos barcos, las fuertes variaciones de la estela, etc., han hecho que el diseñador del buque tenga más dificultades a la hora de abordar problemas entre los que cabría destacar las vibraciones causadas por la cavitación.

En este ensayo, se ha realizado un estudio comparativo de la intensidad de los pulsos de presión en el casco del buque, como consecuencia directa de la aparición de cavitación en el flujo que rodea al propulsor.

Para la realización de este ensayo se han utilizado diferentes tipos de hélices, empleando como parámetro de referencia la clara³ y analizando la variación de la potencia.

También se estudia la influencia que tiene la clara en los pulsos de presión en situación de no cavitación.

Introducción

La onda de presión generada por el flujo cavitante que rodea la hélice, cubre un espectro muy amplio en frecuencias entre 10 y 100 KHz. Las bajas frecuencias, importantes en la generación de vibraciones en la bovedilla del codaste, tienen su origen en la inestabilidad de un dominio de burbujas (variaciones de volumen de una cavitación lámina intermitente) en su crecimiento y en la primera fase del colapso de las burbujas. Las altas frecuencias tienen su origen en la fase final del colapso.

Las fluctuaciones de presión producidas por el propulsor inducen vibraciones en la bovedilla del codaste cuya intensidad depende a su vez de la respuesta estructural del buque. La cavitación origina gran parte de las vibraciones que se transmiten a través de la línea de ejes.

³ Distancia vertical de la punta de la pala a la bovedilla del codaste.

Las vibraciones inducidas por los propulsores han cobrado una gran importancia últimamente. Su normativa ha sido cada vez más restrictiva en cuanto a los niveles de vibraciones y ruidos admisibles para mejorar la estructura del buque y el confort humano.

La construcción de modelos y su ensayo en los túneles de cavitación sirven para medir los pulsos de presión, utilizando captadores de presión. La integración de sus amplitudes con sus fases, permiten el cálculo de la fuerza excitadora sobre la superficie de la bovedilla del codaste.

Una correcta predicción de la intensidad de los pulsos de presión y sus fases en base a los datos obtenidos en los ensayos con modelos permite:

- Optimizar los proyectos mejorando la habitabilidad de los buques al disminuir los ruidos y las vibraciones.
- Mejorar las capturas de los buques de pesca. Disminuyendo y/o adaptando las amplitudes del ruido en las zonas del espectro en las que sus frecuencias coinciden con las del aparato auditivo de los peces.
- Asegurar un bajo nivel de detección e identificación de los buques de guerra.

Se realizaron medidas de pulso de presión en un buque Ferry, comparándose con las medidas obtenidas en los ensayos en el túnel de cavitación, obteniendo resultados muy satisfactorios.

Para el mismo buque se analizaron las fuertes fluctuaciones de presión y ruidos inducidos, producidos por las hélices convencionales cuando estaban en maniobra. Se generaba un espectro de banda ancha, provocando la aparición de fenómenos de resonancia locales. Al sustituir las hélices convencionales por hélices de extremos de pala cargados, el espectro resultó diferente, disminuyendo las vibraciones y los ruidos.

Ensayos realizados

Para la realización de los ensayos, se han hecho con cinco buques diferentes, de características y dimensiones diferentes, así como diferentes propulsores.

En unos buques se ha estudiado la influencia que tiene la clara en las fluctuaciones de presión para lo que se han utilizado hélices convencionales y hélices de extremos de pala cargados.

El análisis de la influencia de la clara se ha realizado para la situación de navegación de cada buque, con los fenómenos de cavitación desarrollados sobre las palas de las hélices y en ausencia de cavitación, es decir, para un índice de cavitación inferior al del inicio de la cavitación, la inyección.

También veremos los resultados de las amplitudes de los pulsos de la presión inducida por la cavitación, considerando dos buques ensayados a distintas potencias.

Para desarrollar los trabajos en el túnel de cavitación, se debe hacer previamente unos ensayos en el canal de aguas tranquilas para conocer las características del propulsor aislado y el campo de velocidades en el disco de la hélice. También se analizan los ensayos de autopropulsión para definir la condición de navegación de cada buque.

Para la simulación de la estela nominal se prepara la correspondiente malla metálica que reproduce el campo de la distribución de velocidades para el calado considerado.

Definida una condición de navegación, se calculan los valores de los parámetros que gobiernan los ensayos de fluctuaciones de presión y se mide la intensidad de los pulsos de presión.

En una primera fase, para la medición de los pulsos de presión, se situaron seis captadores de presión en una placa plana colocada a una distancia que es la correspondiente a la clara vertical del buque para los propulsores ensayados. La separación entre los captadores de presión instalados en la placa se mantuvo constante en todos los ensayos realizados. Esta separación fue de 40 mm de popa a proa y de babor a estribor, como podemos ver en la siguiente imagen.

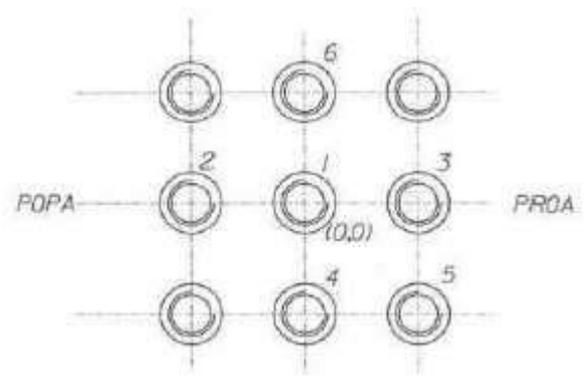


Figura 64: Situación de los captadores de presión

Para analizar la influencia de la clara vertical, se realizan diversas medidas de pulsos de presión variando la clara desde la punta de la pala hasta la placa.

Se realizaron ensayos eliminando la cavitación. De este modo, se ha analizado la influencia de la separación de la placa con cavitación y sin ella con distintas hélices convencionales y hélices de extremos de pala cargados.

Ensayos realizados con diferentes claras sin cavitación

Las amplitudes de los pulsos de presión se pueden dividir en dos partes; la amplitud correspondiente a la hélice sin cavitación, es decir, cuando el ensayo se realiza con un índice de cavitación inferior al índice de inyección, y la amplitud correspondiente al efecto de la cavitación.

Aunque en todas las condiciones de navegación se han producido fenómenos de cavitación, se ha considerado importante lo que ocurre sin cavitación, debido a que en estas condiciones la influencia de la separación entre la hélice y el casco es muy importante en la variación de la hélice sin cavitación. Al influir en menor medida otros parámetros como son la estela y la distribución de la carga en las palas.

Ensayos realizados con diferentes claras en las situaciones reales del buque

Las amplitudes de cavitación y no cavitación están relacionadas. Esta relación se ve condicionada por el índice de cavitación en el momento de la inyección y el índice de cavitación para la condición de navegación del buque. También se ve condicionada por diferentes parámetros, en los que destaca la distribución de la estela en la parte alta del disco de la hélice.

Influencia de la potencia

Las amplitudes de los pulsos de presión aumentan con la potencia en algunos casos.

Consideraciones finales

1. Se ha estudiado la influencia de la separación entre hélice y casco en los pulsos de presión en diferentes propulsores y diferentes buques. En las situaciones de hélice cavitando en la condición de navegación y hélice no cavitando. Se observó la gran influencia que tiene la clara en la amplitud de los pulsos de presión.
2. En todos los ensayos se observó una disminución significativa de las amplitudes de los pulsos de presión al aumentar la clara.
3. La disminución de la amplitud de los pulsos de presión es muy similar en todos los captadores.
4. Ante los resultados obtenidos de los pulsos de presión con hélice convencional y hélice de extremos de pala cargados se comprobó la disminución de las amplitudes de los pulsos al disminuir la potencia de los buques.

CONCLUSIONES

En este trabajo he intentado hacer una especie de manual sobre todas las hélices existentes actualmente, explicando cada una de ellas de forma detallada viendo las ventajas e inconvenientes que supone instalar un tipo de hélice u otra en nuestro buque.

De la primera parte del trabajo, centrado en las hélices, hay que destacar el apartado de "Parámetros para escoger la hélice adecuada", que sería lo más importante en la realidad a la hora de tomar la decisión de qué hélice escoger.

Una vez conocidas todas las hélices, sabiendo qué aporta cada una, escogeremos la que más nos convenga para nuestro buque. De nuestro buque debemos conocer cuál será su ruta más habitual, en qué puertos atracará y cuál es su finalidad, ya que el sistema propulsor nos debe ayudar para la realización de las maniobras de la forma más fácil y eficaz posible. Una decisión incorrecta a la hora de la elección de la hélice nos dará problemas para nuestro buque, para el casco y para la hélice ya montada. Debido a los elevados costes que suponen las hélices no convencionales, la mayoría de armadores optan por sistemas de propulsión de paso fijo, seguido por los de paso variable. Sin embargo, si tenemos una gran necesidad de maniobra o potencia escogeremos otro tipo de hélice.

Tenemos que conocer todos los parámetros que afectan a la hora de seleccionar la hélice. Como ya hemos visto, el tamaño de la hélice se tiene que adaptar al buque. No podemos tener una hélice pequeña para un gran buque o viceversa, ya que causará problemas. También debemos conocer el sentido de giro de la hélice o hélices, ya que esto influirá a la hora de la maniobra, tanto en puerto como en navegación. Por último, el rendimiento debe ser el mejor posible. Éste aumenta cuando el número de palas es menor, pero en según qué buques, las hélices no pueden tener un número pequeño de palas, ya que las hélices deben tener la suficiente potencia para hacer avanzar al buque. Debe haber un equilibrio entre rendimiento y número de palas.

Tengo que destacar un tipo de hélice que me ha sorprendido de forma positiva. Es la hélice de extremos de pala cargados, también conocida como CLT (*Contracted Loaded Tip*). Las placas de cierre que incorporan en los extremos de las palas permiten que la distribución radial de empuje en la pala tenga su máximo más próximo al extremo, lo que hace mejorar su rendimiento. Además, tiene grandes ventajas como mayor rendimiento, mayor velocidad del buque, menor consumo de combustible,

menor contaminación, mejor maniobrabilidad, menores ruidos y vibraciones y, tal vez lo más importante, le cuesta más tener cavitación. Para evitar problemas en un futuro, este tipo de hélices es de las más convenientes para instalar en nuestro buque.

Muchas otras hélices también nos aportan grandes ventajas, y que también hay que destacar. Éstas son las azimutales, las que tienen el sistema de tobera, contrarrotativas, dobles hélices, propulsores de eje vertical (*Voith - Schneider*), hélices de paso variable y controlable, etc. Cada una, como ya hemos visto, nos aporta algo diferente a otra hélice.

En la segunda parte del trabajo, dónde hemos hablado del fenómeno de la cavitación, hemos visto todos los tipos de cavitación que pueden aparecer en nuestra hélice y, en cada caso, cómo le afectaría a ésta. Antes de todo, hay que intentar evitar tener cavitación, pero si se produce, saber los efectos y consecuencias que producen en nuestra hélice afectada.

Estos efectos y consecuencias hay que conocerlos. La primera sospecha de la aparición de la cavitación en nuestras hélices son las vibraciones y el ruido que hay en el buque. Estas vibraciones y el ruido generado por la cavitación provocan una pérdida considerable de rendimiento de la hélice. En el momento de que hay cavitación, la hélice sufre diversos daños, clasificados en deterioro, erosión y corrosión.

Estos daños, debido a la formación de burbujas y su colapso, provocan picaduras y grandes zonas irregulares en la superficie de las palas. Estas zonas dañadas, son las que afectan al rendimiento de la hélice, ya que han sufrido cavitación.

Por último, como hemos visto, se realizan pruebas de mar en el Túnel de Cavitación en los centros dedicados a ello. En estos centros, en España el CEHIPAR de El Pardo en Madrid, se reproducen maquetas a escala y se realizan varios ensayos y estudios para evitar este fenómeno de la cavitación. Los ensayos y estudios que se realizan son los siguientes:

- Ensayos de visualización de cavitación.
- Ensayos de inyección de cavitación.
- Medidas de fluctuaciones de presión.
- Medidas y análisis de ruidos.
- Optimización de proyectos de mallas y "*Dummy models*".
- Medidas de estelas nominales⁴ y efectivas⁵.

⁴ Diferencia entre velocidad del buque y velocidad de entrada de agua en un punto del disco de la hélice.

- Comportamiento de propulsores con eje inclinados.
- Ensayos de apéndices.
- Predicción de la erosión.
- Medida de rugosidad superficial de las palas de hélices a escala real.
- Incidencia del espectro nuclear de cavitación en la inyección y otros fenómenos.
- Correlación modelo - buque.

Con los resultados obtenidos gracias a estos ensayos y estudios se procederá a rediseñar la hélice para encontrar el propulsor más adecuado. No encontraremos una hélice que no cavite, porque todas, en algún grado, lo hace.

Las picaduras en la superficie de las palas generadas por el colapso de burbujas inducen a la aparición de turbulencias y a la aparición de la cavitación. Debido a esto, cuando el buque está en astillero para ser reparado, hay que pulir la hélice y evitar que cualquier producto quede incrustado en las palas rompiendo la regularidad de la superficie.

Cuando se está a bordo, el fenómeno de la cavitación es muy difícil de controlar por la tripulación en las operaciones habituales. La única solución que puede impedir la aparición de cavitación es estibar la carga en el buque correctamente pensando cómo va a quedar sumergida la hélice. Sin embargo, cuando la embarcación empieza a vibrar y hay ruidos, el capitán debe tomar una de estas decisiones:

- Reducir las revoluciones de la hélice, de esta manera no habrá presiones tan bajas en la cara de succión.
- Lastrar el peak de popa para sumergir la hélice hasta zonas de mayor presión.
- No volver a cargar el buque en esas condiciones para que la hélice nunca esté tan cerca de la superficie.

Si no se puede variar ninguno de estos parámetros, se debe ir a astillero y alterar la geometría de las palas de la hélice. De vez en cuando, la elección de la hélice no ha sido la adecuada y se tiene que montar una nueva.

La cavitación no supone solo una vibración incómoda y un aumento del ruido. Además, puede dejar inutilizada la hélice en un intervalo de tiempo pequeño y, en el peor de los casos, averiar el eje de cola del motor principal.

⁵ Valor de la estela nominal corregida en cada punto por las velocidades inducidas del propulsor.

BIBLIOGRAFIA

- De la Llana, I. Nuevo Sistema de Propulsión Naval. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, 2011. Disponible en:
http://www.ehu.es/argitalpenak/images/stories/tesis/Ciencia_y_Tecnologia/Nuevo%20sistema%20de%20propulsion%20nava.pdf
- Pomero, V. y Bonneau, D. El fenómeno de cavitación. Disponible en:
http://www.sofmmoo.com/espagnol/bonneau_cavitacion.pdf
- Callejón, J.L., Núñez, J.F. y Masip, J. Cavitación en hélices en timón-tobera. Influencia del ángulo de giro. Publicación 61 del CEHIPAR, 1978. Disponible en: <http://www.cehipar.es/files/users/publicaciones/061.pdf>
- Masip, J. y Quereda, R. Pulsos de presión debidos a cavitación. Influencias de la separación entre la hélice y el casco. Publicación 214 del CEHIPAR, 2009. Disponible en: <http://www.cehipar.es/files/users/publicaciones/214.pdf>
- Martínez, J., González, J., Balbona, L. y Blanco, E. Análisis del flujo en una hélice marina. Actas del XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. 2002. Disponible en:
[http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/publicaciones/atrpdf/2002_XVCIMhelice\(O-00-027\).pdf](http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/publicaciones/atrpdf/2002_XVCIMhelice(O-00-027).pdf)
- Justes, T. y Martínez, A. Problemas que se generan en las hélices: cavitación y averías. PFC-LTNM, UPC-FNB, 2008. Disponible en:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/5745>
- CDN El Cano. Maniobras. Propulsión y gobierno. Disponible en:
kimerius.com/app/download/5780662792/Maniobras.pdf

Páginas webs consultadas:

- D'Ambrosio, C. La hélice. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: <http://www.nauticaygps.com.ar/Tecnologia/helice/helice.html>
- Departamento de Pesca. Medidas técnicas: la hélice. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/x0487s/X0487S05.htm>
- STP Schottel Twin Propeller. Doble hélice Schottel. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: http://www.schottel.nl/pdf_data/esp_STP.pdf
- Varios documentos en www.ricepropulsion.com [Consulta: Octubre 2013]
- Mecánica de fluidos. La cavitación. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: <http://ingenieros2011unefa.blogspot.com.es/2008/01/cavitacion.html>
- Diseños de la hélice. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: http://www.tpl-es.com/disenos_de_la_helice.html
- Ventajas de la doble hélice de Duoprop. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: http://www.volvopenta.com/volvopenta/spain/es-es/marine_leisure_engines/drives/dph_duoprop/the_benefits_of_duoprop/Pages/the_benefits_of_duoprop.aspx
- Sistemar. Hélices CLT. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: <http://sistemar.sarein.com/H%C3%A9licesCLT/tabid/204/language/es-ES/Default.aspx>
- Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. [Consulta: Octubre 2013] Disponible en: <http://www.cehipar.es/>

El capitán verdadero, embarca el primero y desembarca el postrero.