



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño técnico y análisis de fabricación de una hélice marina

MEMORIA PRESENTADA POR:

Iván García Castellanos

TUTORES:

Teodomiro Boronat Vitoria

Juan Ivorra Martínez

GRADO DE

INGENIERÍA MECÁNICA

Convocatoria de defensa: Septiembre 2021

RESUMEN

“Diseño técnico y análisis de fabricación de una hélice marina”

El presente trabajo está enfocado en ofrecer una alternativa de diseño de una hélice marina, en concreto una hélice de 3 álabes para el motor Honda BF5A.

Para ello se va a hacer un rediseño de los álabes para lograr una fuerza de impulso mayor y una mejora en el reparto de presiones en las caras de las palas para así evitar unas deformaciones excesivas y pérdidas por vibraciones. Todo ello teniendo en cuenta las dimensiones que debe cumplir según el fabricante, ya que las únicas medidas dadas son el diámetro y el paso de hélice.

El modelo alternativo se diseñará con la finalidad de conseguir una hélice más ligera, con un material más barato y que pueda ser fabricada en un proceso óptimo para piezas tan complejas.

Para lograr este objetivo se ha hecho uso de programas informáticas tales como SolidWorks (versión 2020) y Granta Edupack (versión 2021 R1). Estas herramientas serán de ayuda para realizar los estudios de simulación de fluido, el estudio estático para análisis de carga y como base de datos para la selección del material.

Además, se realizará un breve repaso por diferentes procesos de fabricación y se hará selección de un proceso que se adecúe al proyecto que se presenta. Por último, se estudiará la viabilidad económica de hacer una producción en masa de esta pieza según el diseño, material y proceso de fabricación utilizado.

PALABRAS CLAVE

Hélice marina, selección de materiales, fabricación, CAD, CAE

SUMMARY

“Technical design and manufacturing test of a marine propeller”

The present work is focused on offering a design alternative for a marine propeller, particularly a 3-blade propeller for the Honda BF5A engine.

For that purpose, a redesign will be carried out to achieve a greater pushing force and an improvement in the distribution of pressures on the faces of the blades to avoid undue deformations and losses due to vibrations. All this taking into account the dimensions that must be achieved according to the producer, since the only measurements given are the diameter and the helix pitch.

The alternative model will be designed in order to achieve a lighter propeller, with a cheaper material and it can be manufactured in an optimal process for such complex parts.

To achieve this objective, computer programs such as SolidWorks (version 2020) and Granta EduPack (version 2021 R1) have been used. These tools will come in handy to carry out fluid simulation studies, static study for load analysis and as a database for material selection.

In addition, a brief review will be carried out through different manufacturing processes and a process will be selected that adapts the project that is presented. Finally, the economic viability of mass production of this piece will be studied according to the design, material and manufacturing process used.

KEYWORDS

Marine propeller, material selection, manufacturing, CAD, CAE

RESUM

“Disseny tècnic i anàlisi de fabricació d'una hèlice marina”

Aquest treball està enfocat a oferir una alternativa de disseny d'una hèlice marina, més en concret una hèlice de 3 pales per al motor Honda BF5A.

Per això es farà un redissenye dels àleps per a aconseguir una força d'impuls major i una millora en la distribució de pressions en les cares de les pales per a així evitar unes deformacions excessives i pèrdues per vibracions. Tot això tenint en compte les dimensions que ha de complir les indicacions del fabricant, ja que les úniques mesures donades són el diàmetre i el pas d'hèlice.

El model alternatiu es va a dissenyar amb la finalitat d'aconseguir una hèlice més lleugera, amb un material més barat i que pugui ser fabricada en un procés òptim per a peces tan complexes.

Per a aconseguir aquest objectiu s'ha fet ús de programes informàtics com ara SolidWorks (versió 2020) i Granta EduPack (versió 2021 R1). Aquests programes seran d'ajuda per a realitzar els estudis de simulació de fluid, l'estudi estàtic per a anàlisi de càrrega i com a base de dades per a la selecció del material.

A més, es realitzarà un breu repàs per diferents processos de fabricació i es farà selecció d'un procés que siga vàlid amb el projecte que es presenta. Finalment, s'estudiarà la viabilitat econòmica de fer una producció en massa d'aquesta peça segons el disseny, material i procés de fabricació utilitzat.

PARAULES CLAU

Hèlice marina, selecció de materials, fabricació, CAD, CAE

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS	15
LISTADO DE TABLAS.....	19
I. INTRODUCCIÓN	21
I.1. ANTECEDENTES.....	23
TIPOS DE BARCOS A MOTOR	23
<i>BARCOS AUXILIARES</i>	23
<i>LANCHAS</i>	24
<i>BARCOS DE PESCA DEPORTIVA</i>	26
<i>YATES</i>	27
PARTES DE UN BARCO.....	28
TIPOS DE MOTORES	30
<i>MOTORES FUERABORDA</i>	30
<i>MOTORES INTRABORDA</i>	32
HÉLICE.....	34
<i>PARTES DE UNA HÉLICE</i>	34
<i>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE UNA HÉLICE MARINA</i>	35
<i>TIPOS DE HÉLICES</i>	38
<i>MATERIALES DE FABRICACIÓN DE HÉLICES</i>	42
<i>FUERZAS GENERADAS EN LA HÉLICE</i>	43

UNIDADES DE MEDIDAS NÁUTICAS.....	44
I.2. SELECCIÓN DE LA HÉLICE.....	47
II. OBJETIVOS.....	51
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	53
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.	53
III. DESARROLLO PROYECTO.....	55
III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS.....	57
III.2. NORMATIVA APLICABLE.....	65
III.3. ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO DEL MODELO INICIAL.....	67
III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES.	75
III.5. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO.	81
III.6. SIMULACIÓN MEDIANTE FEM DEL MODELO INICIAL DE LA HÉLICE.....	83
III.6.1. Modelo FEM proyecto.	83
III.6.1.1. Aplicación de estados tensionales.	83
III.6.1.2. Aplicación de materiales.....	83
III.6.2. Análisis de estados tensionales y deformaciones.	84
III.7. DISEÑO FINAL.....	89
ESTUDIO DINÁMICA DE FLUIDO DEL DISEÑO FINAL.....	92
ANÁLISIS DE CARGAS Y SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA ALTERNATIVA DE DISEÑO.....	95
III.8. FABRICACIÓN.	101
FUNDICIÓN	101

<i>FUNDICIÓN EN MOLDE DESECHABLE</i>	102
ELECCIÓN PROCESO DE FABRICACIÓN.....	106
III.9. ESTUDIO ECONÓMICO.	109
COSTE DE MATERIALES.....	109
COSTE DE MANO DE OBRA	109
COSTE ENERGÉTICO.....	110
IV. APÉNDICES	113
IV.1. REFERENCIAS	115
IV.2. NORMATIVA.....	119

ABREVIATURAS

cm³ Centímetros Cúbicos

GPa Gigapascales

mm Milímetros

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura I.1. Barco Auxiliar Inflable con Suelo Rígido que permite transportar un peso considerable</i>	24
<i>Figura I.2.- Lancha cabinada con diseño de popa abierta que permite entrar a la cabina</i>	25
<i>Figura I.3.- Lancha semirrígida utilizada por guardacostas. Se puede observar como el casco es metálico mientras que en los extremos de la cubierta tiene flotadores</i>	26
<i>Figura I.4.- Crucero destinado al ocio, con un diseño más sofisticado que el resto de embarcaciones más comunes.</i>	27
<i>Figura I. 5.- Descripción Gráfica de las Partes de un Barco</i>	29
<i>Figura I.6.- Motor fueraborda con un sistema de engranajes que permiten el cambio de posición y poder sacarlo del agua cuando la embarcación está parada.</i>	32
<i>Figura I. 7.- Dispositivo de control de dirección, característico de un motor intraborda Pod Drive</i>	33
<i>Figura I.8.- Descripción Gráfica de las partes de una hélice</i>	35
<i>Figura I.9.- Ejemplo de diferentes Pasos de Hélice dependiendo de la geometría de las palas</i>	36
<i>Figura I.10.- Sentido de Giro Levógiro</i>	37
<i>Figura I.11.- Sentido de Giro Dextrógiro</i>	37
<i>Figura I.12.- Ejemplo de Hélices con diferente Rake</i>	38
<i>Figura I.13.- Hélice de Paso Controlable por Mecanismo Mecánico (engranajes)</i>	39
<i>Figura I.14.- Hélice de paso variable conseguido gracias a un diseño ondulado de las caras del álabe</i>	40
<i>Figura I.15.- Caso de una embarcación avanzando con una hélice levógira</i>	44
<i>Figura I.16.- Motor fueraborda Honda BF5A, equipada con la hélice</i>	48
<i>Figura I.17.- Profundidad aproximada según rango del peto (Información ofrecida en el Manual de Usuario de Honda)</i>	48
<i>Figura III.1. a) Definición de las medidas del perfil del núcleo de la hélice, b) vista del núcleo después de la revolución total de base.</i>	57
<i>Figura III.2. a) Geometría definida del perfil del álabe, b) resultado de la pala de la hélice tras realizar la extrusión de 5 mm.</i>	58
<i>Figura III.3. a) Comparativa entre la posición inicial del álabe en sombreado, y el álabe tras realizar la flexión que garantice un mayor apoyo b) vista de la hélice después de realizar una matriz circular que equidiste 3 álabes a 120º.</i>	59
<i>Figura III.4. a) Vista frontal de la hélice tras realizar el vaciado interior y el cilindro que forme base de su estructura interna b) vista de la hélice después de realizar la extrusión del apoyo interno y la matriz circular.</i>	60

<i>Figura III.5. a) Vista ampliada del croquis realizado para crear la zona de ajuste con el eje que une la hélice con el motor b) vista frontal de la hélice después de realizar el corte que crea las hendiduras interiores del cilindro interior del núcleo.</i>	60
<i>Figura III.6. a) Vista ampliada de la hélice tras realizar redondeos tanto en su base como en la unión de las caras activa y pasiva con el perfil lateral b) vista ampliada de la estructura interna del núcleo de la hélice tras realizar chaflanes al cilindro interno y redondeos en los apoyos de ésta.</i>	61
<i>Figura III.7. Capacete diseñado a partir de un croquis con splines y con una operación de revolución de base.</i>	62
<i>Figura III.8. Operación de hélice/espiral hecha para comprobar que las dimensiones de la pieza cumplen con las demandas del fabricante.</i>	62
<i>Figura III.9. a) Imagen de la hélice suministrada por Honda para su motor BF5A. b) Vista frontal del diseño del modelo inicial de la hélice.</i>	63
<i>Figura III.10. Ensamblaje constituido por la hélice, el volumen de control y el volumen del elemento rotativo, que servirá de apoyo para simular la dinámica de flujo.</i>	68
<i>Figura III.11. Sentido de giro de la hélice en la simulación con el valor de la velocidad angular asignada.</i>	70
<i>Figura III.12. Selección del volumen de control interno para definir la presión ambiente dentro de éste. Diferenciación entre caras externas e internas del volumen de control.</i>	70
<i>Figura III.13. Resultado de la simulación v1 mostrado como Cut Plot</i>	72
<i>Figura III.14. Resultado de la simulación v1, mostrando los valores de presiones en la superficie de la hélice tras insertar un Surface Plot.</i>	73
<i>Figura III.15. Visualización de la velocidad del flujo en la dirección del eje Z y de la trayectoria del fluido en su contacto con la hélice</i>	74
<i>Figura III.16. Valores introducidos para buscar un aluminio barato y con suficiente límite elástico</i>	78
<i>Figura III.17. Resumen de la selección de material para el modelo inicial de la hélice</i>	79
<i>Figura III.18. Propiedades del aluminio 5182-H19, introducido en la base de materiales de SolidWorks</i>	84
<i>Figura III.19. Resultado de las tensiones según VonMises de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19</i>	85
<i>Figura III.20. Resultado de los desplazamientos de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19</i>	85
<i>Figura III.21. Resultado de las deformaciones unitarias de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19</i>	86
<i>Figura III.22. a) Geometría definida del perfil del álabe de la HÉLICE v2, b) resultado de la pala de la hélice tras realizar la extrusión de 4,5 mm.</i>	90
<i>Figura III.23. a) Geometría del álabe tras la primera flexión realizada, b) resultado de la pala tras la segunda flexión, consiguiendo tener un mayor área útil para realizar las fuerzas de empuje y de giro necesarias.</i>	91

<i>Figura III.24. Resultado de la simulación v2 mostrado como Cut Plot</i>	<i>93</i>
<i>Figura III.25. Resultado de la simulación v2, mostrando los valores de presiones en la superficie de la hélice tras insertar un Surface Plot.</i>	<i>94</i>
<i>Figura III.26. Visualización de la velocidad del flujo en la dirección del eje Z y de la trayectoria del fluido en su contacto con la hélice</i>	<i>95</i>
<i>Figura III.27. Límite elástico que esta hélice solicita después del estudio estático.</i>	<i>96</i>
<i>Figura III.28. Resumen de la selección de material para la HÉLICE v2</i>	<i>97</i>
<i>Figura III.29. Resultado de las tensiones según VonMises de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0</i>	<i>98</i>
<i>Figura III.30. Resultado de los desplazamientos de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0</i>	<i>99</i>
<i>Figura III.31. Resultado de las deformaciones unitarias de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0</i>	<i>100</i>
<i>Figura III.32. Placa metálica dividida en dos partes que forman el modelo para la fundición de arena.</i>	<i>103</i>

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.- Comparativa entre las distintas series de aluminio

77

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. ANTECEDENTES.

El elemento de estudio de este trabajo será una hélice marina, que es una de las partes más importantes de la estructura motora de una embarcación ya que es la pieza encargada de transformar la potencia del motor en un impulso en el barco para que éste avance gracias a su movimiento rotacional. Esta hélice debe ser elegida según diversos factores como: el tipo de barco, tipo de motor, régimen de giro al que se desea ir... Es por ello por lo que, a continuación, se va a realizar un breve resumen de todas estas variaciones del mundo náutico, centrándonos en navíos a motor.

TIPOS DE BARCOS A MOTOR

Existen diferentes usos de una embarcación, ya sea para trabajar; como pueden ser los pesqueros; para viajar, como son los cruceros; o para tiempo de ocio, como las motos acuáticas. Por esta razón, hay motores asociados a tipos de embarcaciones ya que por el desempeño que según el desempeño que se desea lograr se necesitará una mayor potencia, una mayor velocidad de crucero o mejor maniobrabilidad. Entre las embarcaciones a motor más comunes destacan:

BARCOS AUXILIARES

Estas embarcaciones son las encargadas de transportar personas y objetos desde tierra firme a barcos de mayores dimensiones. Dentro de esta categoría existe una extensa gama de barcos.

En un extremo, se encuentra el barco auxiliar de estructura rígida y con un diseño que ofrece una mayor comodidad y autonomía, pensado para clientes con mayor

I. Introducción

presupuesto y siendo este navío la segunda opción que acompaña normalmente a un yate o superyate.

Por otro lado, está el barco auxiliar inflable con motor de poca potencia. Este es el más común de la categoría gracias a su capacidad de almacenaje ya que se puede deshinchar y plegar para que no ocupe espacio en la embarcación. Normalmente está fabricado de cloruro de polivinilo (PVC), un material más económico y de poco peso que ayuda a desmontar el barco; y también puede estar construido de Hypalon, un material más duradero, siendo éste un elastómero resistente a la luz ultravioleta, temperaturas muy altas y alta resistencia mecánica. A su vez, estos barcos inflables puede que no lo sean totalmente y que el suelo sea rígido, como se trata la embarcación de la imagen 1, que es capaz de transportar bastante peso por las travesías más exigentes, aunque ya no sean tan manejables fuera del agua.



Figura I.1. Barco Auxiliar Inflable con Suelo Rígido que permite transportar un peso considerable

LANCHAS

En este apartado se hará una diferenciación entre las tres clases de lanchas que coexisten.

I. Introducción

LANCHAS CABINADAS

Este tipo de lancha es parecido a un crucero, aunque siendo de una escala en tamaño menor. Se caracteriza por ser capaz de albergar en su interior un dormitorio, por lo que está preparado para que un par de personas pernocten y vivan en la embarcación durante unos días. En lo referente al diseño, es frecuente que tenga una proa cerrada donde está situada la cabina del capitán del barco y una popa abierta para entrar a la cabina, como se ve en la Imagen 2. Estas lanchas deben tener un motor de mayor potencia que los utilizados en las barcas auxiliares nombradas anteriormente, además de ser aptos para un tiempo de uso más prolongado.



Figura I.2.- Lancha cabinada con diseño de popa abierta que permite entrar a la cabina

LANCHAS DE PROA ABIERTA

Estas lanchas, también conocidas como con su apelativo inglés “bowrider”, es una de las embarcaciones que tiene mayor volumen de personalización, ya que se le puede añadir varios complementos relacionados con la confortabilidad. Además, se puede configurar la disposición del motor del barco para que sea un motor intraborda, que ya se explicará a lo largo del trabajo qué es y qué funcionalidad tiene. Las velocidades alcanzadas con estas lanchas pueden llegar a ser de más de 60 kilómetros por hora.

I. Introducción

LANCHAS SEMIRRÍGIDAS

El nombre de esta clase de navíos se debe a que, a pesar de que la estructura del casco sea rígida, incorpora unos flotadores hinchables a su alrededor, como se muestra en la imagen 3. Son embarcaciones simples pero seguras, empleadas comúnmente en trabajos de seguridad y salvamento marítimo, pero que en los últimos años se ha tendido a adaptar a requisitos de otro tipo de clientes ya que son de bajo coste y pueden ser usadas para diversas actividades.



Figura I.1.- Lancha semirrígida utilizada por guardacostas. Se puede observar como el casco es metálico mientras que en los extremos de la cubierta tiene flotadores

BARCOS DE PESCA DEPORTIVA

Estas embarcaciones están diseñadas con este propósito, que no es otro de salir al agua para practicar este deporte. Existen diversos modelos de barcos de pesca deportiva, que suelen medir entre 5 y 25 metros de eslora. Entre las características en las que se diferencian respecto a otra clase de embarcación es que está preparado para que sea lo más estable posible en reposo y sea más confortable a la hora de pescar. Asimismo, la parte delantera del barco es frecuente que tenga más altura para que el oleaje sea menos molesto y no entre agua al interior. Para contrarrestar este cambio de altura, en

I. Introducción

la parte trasera lo que se busca es tener un buen apoyo que ayude a mejorar la flotabilidad, principalmente cuando el navío navega a bajas velocidades.

YATES

En esta categoría entran las embarcaciones de recreo de mayor presupuesto. La manera más fácil de diferenciarse con un crucero es por su longitud de eslora, ya que si esta es menor a 1 decámetro se hablará de crucero y, por el contrario, si ésta es mayor se trata de un yate. Estos barcos es frecuente que alberguen todo tipo de facilidades para poder vivir una temporada a bordo y es por ello por lo que se diferencia fácilmente de otras embarcaciones por sus grandes dimensiones y por su diseño más elegante. En la siguiente imagen se puede ver un crucero de una eslora menor a 10 metros, pero en la que posee un diseño más acuñado y una zona diseñada para el descanso de los navegantes en las amuras y proa.



Figura I.2.- Crucero destinado al ocio, con un diseño más sofisticado que el resto de embarcaciones más comunes.

I. Introducción

PARTES DE UN BARCO

Una vez repasado diferentes tipos de las embarcaciones más comunes, se va a definir algunos de los conceptos náuticos referentes a las partes de un barco:

Proa: Parte de delante de un barco, con geometría en forma de cuña para cortar las olas y que sea más sencilla la navegación.

Popa: Parte de atrás de un barco. Es donde va instalado los motores fueraborda y algunos intraborda.

Estribor: Lateral derecho del barco.

Babor: Lateral izquierdo del barco.

Amuras: Son los estrechamientos que se crean tanto en estribor y babor para formar la proa. Se puede decir que son las esquinas de la parte trasera de la embarcación.

Costados: Se trata de las partes de estribor y babor que son verticales y se encuentran en paralelo.

Aletas: Al igual que las amuras, son estrechamientos de estribor y babor, pero esta vez crean la popa.

En la imagen 5 se puede observar las diferentes partes del barco que se acaban de describir:

I. Introducción

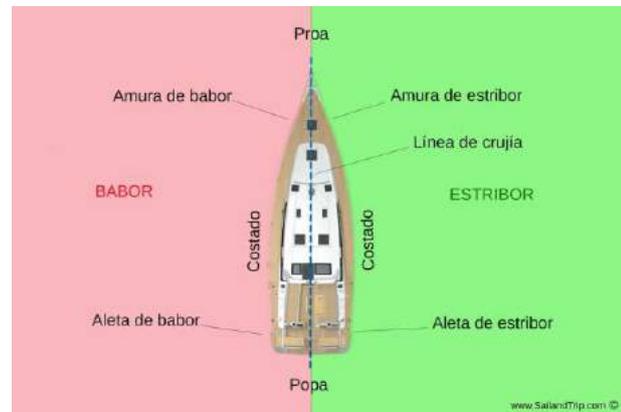


Figura I. 3.- Descripción Gráfica de las Partes de un Barco

Línea de crujía: Es la línea imaginaria que divide el barco en partes iguales izquierda y derecha.

Cubierta: Parte superior del barco que se utiliza como suelo, y cierra el casco de la embarcación.

Carena: Es la zona del casco que está inmersa en el agua. Se suele emplear pinturas que hagan que no se pegue vegetación marina o moluscos.

Obra muerta: Al contrario que la carena, es la parte no sumergida del casco hasta la cubierta.

Línea de flotación: Es la línea imaginaria que divide la zona sumergida de la que no lo está, es decir, divide la carena de la obra muerta. Esta línea puede variar según lo hundido que puede estar el navío frecuentemente por el peso que alberga.

Sentina: Es la parte inferior del barco justo antes del casco, donde se filtran aceites de maquinaria, agua del mar que entra por el choque con grandes olas y demás líquidos.

I. Introducción

Eslora: Es la distancia que mide la largura de la embarcación.

Manga: Es la distancia que mide la anchura de la embarcación. Se denomina manga máxima a aquella manga que mide la distancia máxima entre babor y estribor.

Puntal: Es la altitud medida desde el punto inferior del casco hasta la cubierta.

Calado: Es la altura del barco que está por debajo del agua.

Francobordo: Es la altura que está por encima del agua. Si el oleaje llega a estar a niveles superiores, el barco naufraga.

TIPOS DE MOTORES

En la actualidad es habitual que se haga la distinción de motores marítimos según su disposición en el barco. Es decir, existen unos otros motores, llamados fueraborda, que están acoplados a la parte trasera del barco (popa). Por otra parte, hay otros motores conocidos como intraborda, que están instalados como una parte más de la embarcación y tienen una zona específica en la que está localizado, que ésta puede llegar a ser una habitación como, por ejemplo, la sala de máquinas. A continuación, se expondrán de manera más detallada estos motores.

MOTORES FUERABORDA

Este tipo de motores es frecuente verlos en barcos ligeros y de poca longitud, especialmente en barcos auxiliares; pero cada vez es más habitual en lanchas semirrígidas y barcos de pesca deportiva gracias a la proyección que han tenido en los últimos tiempos.

I. Introducción

El motor fueraborda se caracteriza por ubicarse en la popa de la embarcación y una vez el motor está apagado, se eleva para que quede completamente fuera del agua. Esta acción hace que el mantenimiento respecto al otro tipo de motor sea menor y, además, al tratarse de motores más sencillos y usualmente de menor potencia, las reparaciones sean menos costosas de realizar.

Por otro lado, la dirección de la embarcación se hace directamente con la palanca de mando o, en su defecto, por consola. Por tanto, el motor necesita este dispositivo de control para poder poner el rumbo deseado, y a su vez también incorpora la hélice.

Aunque es cierto que estos motores consumen más combustible que los motores intraborda para un mismo rendimiento, al hacer uso de una hélice que incorpore unos nervios móviles, hace que las prestaciones en este punto suban al llegar a una mayor profundidad que a la que está el casco de la embarcación y, por tanto, el consumo respecto a la otra clase de motor no sea mucho mayor.

Otra característica de los fuerabordas es su sistema de refrigeración por agua, ya que utiliza un conducto de aspiración situado al lado de la hélice ya que debe sumergirse para transportar el agua y evitar un sobrecalentamiento del motor.

Asimismo, hay dos tipos de motores fueraborda en la actualidad:

Motor fueraborda de 2 tiempos: las ventajas de este tipo de motor es lo compacto que es respecto a tamaño, su bajo precio y peso, y la facilidad de montaje y desmontaje, especialmente cuando se trata de barcas auxiliares hinchables. En los últimos años se ha trabajado en mejorar en la eficiencia y producción de menos contaminantes gracias a la inyección directa de combustible que hace que el consumo sea menor que los motores carburación.

Motor fueraborda de 4 tiempos: las características más importantes de esta clase de motor es el poco ruido que hace y que es menos contaminante que el 2 tiempos

I. Introducción

mencionado. También se ha innovado en este tipo de motores para conseguir una mayor potencia que permita competir a este tipo de barcos en el que es instalado con otro tipo de embarcaciones más grandes.

En la siguiente imagen se muestra un motor fueraborda totalmente montado, a falta de instalarlo en el espejo de popa:



Figura I.4.- Motor fueraborda con un sistema de engranajes que permiten el cambio de posición y poder sacarlo del agua cuando la embarcación está parada.

MOTORES INTRABORDA

Partiendo de la obviedad que al tratarse de motores mucho más grandes y pesados éstos son utilizados en barcos de una longitud mayor a 8 metros, esta clase de motorización tiene una gran variedad en lo que respecta a la disposición del motor y su sistema de gobierno.

Por un lado, existe el motor situado a un tercio de la popa que está accionado por un eje fijo que cruza la parte baja del casco del barco. Esta opción es la más empleada en grandes embarcaciones ya que ofrece una gran potencia y tracción central, y al ser un eje

I. Introducción

fijo centrado a lo largo del barco ayuda a que el peso esté distribuido de una forma más equitativa, siendo un mecanismo más simple y, a su vez, fiable. La dirección de este tipo de motor es liderada por el timón, por lo que al ser una instalación fija no permite cambios en la disposición de estos elementos.

Por otro lado, hay otros motores como son los de cola en Z situados en la popa. Son similares a los fuerabordas grandes, pero con el inconveniente de que no se puede sacar del agua cuando no se use, cosa que provoca que sufra incrustaciones y que el mantenimiento de este tipo de motores deba ser constante y, por lo tanto, suponga un gran desembolso.

Por último, hace menos de dos décadas que nacieron los motores Pod Drive con una tecnología que permite que sean más veloces, consuman menos combustible y tengan más autonomía que un motor intraborda convencional. Estos motores poseen dos hélices que giran en sentido contrario y, al contrario que los motores fueraborda, están orientados hacia la parte delantera del barco. Además, la dirección de estos motores no es piloto gracias a un timón sino a un joystick independiente como el de la imagen 7.



Figura I. 5.- Dispositivo de control de dirección, característico de un motor intraborda Pod Drive

I. Introducción

HÉLICE

Una vez inmersos en el mundo náutico, se va a explicar el papel que tiene una hélice marina en una embarcación. En primer lugar, se va a definir qué es una hélice, siendo esta una pieza formada por una serie de dispositivos llamados álabes o palas, que se colocan sobre un eje de manera concéntrica y que rota alrededor de este eje en el mismo plano. Con la ayuda de las palas, al girar, es capaz de transmitir su energía cinética a un fluido generando una fuerza de tracción.

Su funcionamiento está basado en la geometría de los álabes que crea zonas de depresión al girar sobre sí misma y crea el empuje que hace que el barco se mueva. Es por ello por lo que hay caras en las que el fluido tiene mayor incidencia (cara de presión) y la cara posterior sería la que actúa de manera pasiva (cara de succión).

Uno de los principales problemas que presenta este elemento es descubrir cuál el motor que mejor se conjunta con la hélice, ya que se busca una hélice grande que tiene un mejor rendimiento por su mayor área útil y es por eso por lo que el motor debe ir acorde a ésta.

PARTES DE UNA HÉLICE

Tal como se puede observar en la siguiente imagen, son 4 las partes principales que forman una hélice:

Eje: Elemento de unión entre la hélice y el motor, que transmite el movimiento rotatorio.

Núcleo: Pieza base de la hélice que se ajusta al eje del motor y donde van incorporadas las palas.

I. Introducción

Capacete: Elemento cónico que cierra el núcleo impidiendo el paso de agua a su interior. Es interesante saber que el peso de este capuchón no se tiene en cuenta a la hora de calcular el centro de gravedad de la hélice en el caso de que sea monoblock, es decir, una hélice de una pieza.

Pala: Elemento que va acoplado al núcleo y que produce el empuje del barco.

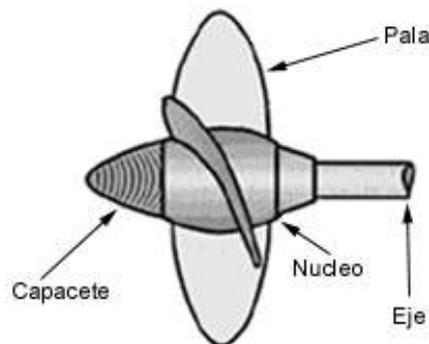


Figura I.6.- Descripción Gráfica de las partes de una hélice

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE UNA HÉLICE MARINA

Ya que la geometría de una hélice es compleja, hay distintas propiedades que ayudan a definir la forma de esta pieza.

NÚMERO DE PALAS

Este término determina la cantidad de palas acopladas al cuerpo de la hélice. El número de álabes elegido va en función de cuánta debe ser el área útil de trabajo que se necesita para lograr el empuje que nos entrega el motor. Normalmente, entre 3 o 6 son el número de palas con el que se fabrican las hélices de motores fueraborda ya que

I. Introducción

ofrecen un mejor rendimiento al alcanzar la velocidad máxima con menos pérdidas, mientras que las hélices de motores intraborda tienen entre 2 o 4 álabes.

DIÁMETRO DE LA HÉLICE

Desde una vista frontal, es el diámetro de la circunferencia que toca los extremos de los álabes cuando este elemento rota alrededor del eje de giro.

PASO (PITCH)

El paso es la distancia teórica que avanza la embarcación por cada revolución de la hélice. Este avance es teórico ya que se asume que no hay deslizamiento. Es por eso por lo que también aparece el término de retroceso, que es la distancia perdida entre el paso teórico y el avance real de la embarcación. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de cómo el cambio del diseño del álabes, principalmente en el ángulo rake, afecta al paso de hélice.

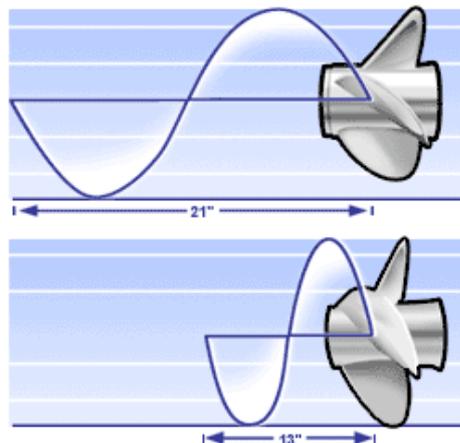


Figura I.7.- Ejemplo de diferentes Pasos de Hélice dependiendo de la geometría de las palas

I. Introducción

SENTIDO DE GIRO

Como ya se sabe, el movimiento rotacional que describe el elemento a analizar puede hacerlo en dos sentidos: horario y antihorario. El movimiento en sentido horario es característico en embarcaciones con dos motores, ya que ayuda a controlar mejor la dirección; mientras que el giro en sentido antihorario está fomentado en embarcaciones con un único motor. Dentro del mundo náutico, se habla de hélices levógiras, como se ve en la imagen 10, si mirando desde la parte trasera del barco giran en sentido antihorario, y si el giro es a la derecha se conoce como hélice dextrógira, caso de la imagen 11.

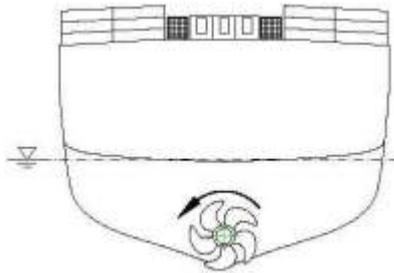


Figura I.8.- Sentido de Giro Levógiro

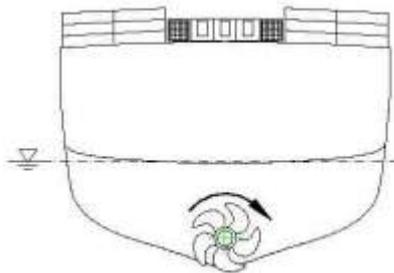


Figura I.9.- Sentido de Giro Dextrógiro

I. Introducción

ÁNGULO DE LA PALA (RAKE)

El rake es el ángulo que forma el núcleo de la hélice y la pala. Según la variación de este ángulo, se puede crear una mayor área útil que afecte a fenómenos como la cavitación. A un mayor ángulo, se produce una menor ventilación y, por lo tanto, la cavitación es menor. Por el contrario, si el ángulo de la pala es excesivo se producirá un sobrecalentamiento en el motor y una bajada en el rendimiento ya que se generarán pérdidas por vibraciones. Esta inclinación se puede apreciar en la imagen 12, donde se observa como un rake de 0° significa que el álabe está de manera perpendicular al eje de rotación de la hélice.

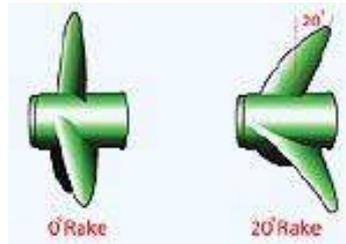


Figura I.10.- Ejemplo de Hélices con diferente Rake

TIPOS DE HÉLICES

La gama de hélices que se pueden encontrar en el mercado es muy amplia por sus múltiples aplicaciones y es por ello por lo que el número de palas, su forma, e incluso su sentido de giro, está diseñado para adaptarse a cada vez más usos.

SEGÚN EL SISTEMA DE PROPULSIÓN

HÉLICES DE PASO CONTROLABLE

En estas hélices el paso se puede configurar gracias a mover los álabes mediante un mecanismo hidráulico o de engranajes. Muestra de ello es la hélice que aparece en la

I. Introducción

imagen 13, donde se puede ver como la unión de los álabes con el núcleo de la hélice es por engranajes pudiendo así rotar las palas según se desee. Este tipo de tecnología aplicada a las hélices es bastante útil a la hora de operar y establecer los parámetros adecuados al motor usado, y principalmente, en condiciones marítimas adversas. Es más costoso que las otras dos hélices que se van a exponer a continuación.



Figura I.11.- Hélice de Paso Controlable por Mecanismo Mecánico (engranajes)

HÉLICES DE PASO FIJO

Estas hélices son las más simples y, por lo tanto, las más baratas. Ya que no posee ninguna tecnología que permita tener partes móviles, el paso no varía. Su fácil mantenimiento y reparación hacen que sea comunes en todo tipo de buques grandes dedicados a la pesca o al transporte marítimo.

HÉLICES DE PASO VARIABLE

En estas hélices se puede cambiar el paso manteniendo la velocidad de giro, cosa que resulta bastante útil desde el punto de vista de la maniobrabilidad. Esto se consigue gracias al diseño de los álabes donde el radio varía y, por consiguiente, el paso también.

I. Introducción

En la imagen 14 se ve una hélice con palas onduladas, esto permite que el propio diseño de la hélice haga que varíe la distancia recorrida por los álabes ya que sus puntos están a diferentes profundidades. Todo esto resulta en una mayor eficiencia y si se considera que el menor paso sea en los extremos de las palas se logrará que sea menor la presión en los álabes y la probabilidad de cavitación.



Figura I.12.-. Hélice de paso variable conseguido gracias a un diseño ondulado de las caras del álabes

SEGÚN SU FABRICACIÓN

Según el diseño de fabricación de una hélice, podemos distinguir dos categorías:

HÉLICES MOLDEADAS

Estas hélices están fabricadas de una sola pieza, normalmente por fundición, aunque se está investigando en utilizar otros procesos de fabricación como la inyección, hasta ahora idea limitada por el desafío que implica diseñar un molde con una geometría tan compleja. Esto permite que se puedan hacer uso de diferente tipo de materiales como: metales, aleaciones, polímeros... Su gran ventaja es que no es necesario que haya un tiempo posterior de ensamblado de álabes al núcleo de la hélice.

I. Introducción

HÉLICES MODULARES

En esta clase de hélices se encuentran las fabricadas por piezas. Cada uno de los álabes se produce por separado y después se une al núcleo.

SEGÚN SU FORMA

Como ya se ha comentado con anterioridad, la superficie de los álabes interviene directamente en el empuje de la embarcación y la cavitación, ya que a menor área la fuerza tiene una menor distribución en la pala de la hélice y por tanto la depresión es aún mayor. Es por eso por lo que se debe optar a aumentar esta superficie útil como medida para que la cavitación no aparezca.

En el caso contrario se encuentra el espesor de los álabes. Cuando esta sección aumenta hay mayor probabilidad de cavitación ya que la succión generada se ve incrementada. Por tanto, un objetivo que se busca en el diseño de hélices es buscar el equilibrio entre la superficie y el espesor de los álabes para que no surjan grandes depresiones.

SEGÚN EL NÚMERO DE ÁLABES

HÉLICES MONOPALAS

Son las hélices que tan solo poseen una aleta. Es por ello que para tener un mayor apoyo y contrarrestar la falta de peso se añade más grosor en la raíz del álabe y tener un centro gravedad más céntrico.

I. Introducción

HÉLICES BIPALAS

Son las que tienen dos aletas situadas a 180° . Por su poca cantidad de palas y lo fácil que resulta producirlas, son unas de las más comunes.

HÉLICES TRIPALAS

Estas hélices están construidas con álabes a 120° entre ellos, muy utilizados en motores fueraborda.

HÉLICES DE MÁS DE TRES PALAS

Son las hélices con 4, 5, 6 o más aletas. Están asociadas a buques de grandes dimensiones y su diseño suele ser bajo demanda dado su baja presencia en embarcaciones más comunes. Los diámetros de estas hélices pueden llegar a medir algunos metros.

MATERIALES DE FABRICACIÓN DE HÉLICES

El objetivo que tiene un ingeniero que diseña una hélice es que ésta sea lo más ligera y rígida que se pueda, que su mantenimiento no resulte dificultoso y que sea resistente a la corrosión que produce el agua del mar y este entorno acuático. A continuación, se van a definir algunos de los materiales empleados en la actualidad para conseguir este propósito:

Polímeros: Dado a su bajo coste y su adaptación a múltiples procesos de fabricación, es uno de los materiales que está teniendo una tendencia ascendente en los últimos años. Además, se adapta muy bien a las condiciones de agua marina y es por ello que para embarcaciones pequeñas y motores con poca potencia es una gran alternativa.

I. Introducción

Bronce: En la antigüedad ya se utilizaba este material por ser barato y por lo simple que resulta restaurar piezas de bronce, aunque últimamente se opta por otros materiales como los dos siguientes.

Aluminio: Es el material más usado hoy en día por propiedades tales como su alta resistencia a la corrosión o lo sencillo que se hace restaurar piezas de este metal.

Acero inoxidable: Éste destaca por ser bastante resistente a ser golpeado o a sufrir rasguños. También es reseñable que las hélices fabricadas con este material suelen tener una vida útil prolongada.

FUERZAS GENERADAS EN LA HÉLICE

Se sabe que una hélice marina trabaja debajo del agua. Dadas estas condiciones este elemento sufre lo conocido como presión hidrostática, ya que soporta la columna de agua que está sobre ésta. También se puede concluir que el álabe inferior soporta más presión que el álabe que esté en ese instante más arriba, puesto que el primero está a más profundidad, aunque esta diferencia sea mínima en pequeñas hélices. Hay que tener en cuenta que, por cada 10 metros de profundidad en el agua, aumenta 1 atmósfera de presión.

Hablando de las fuerzas que genera una hélice, existen dos. La primera es la que da el empuje y hace que la embarcación se mueva. La segunda es la presión que hay a ambas caras laterales del álabe que hace que la embarcación gire.

Asimismo, hay una relación directa del giro de una embarcación según si se trata de una hélice dextrógira o levógira.

Cuando el barco está con el motor acabado y la hélice está en funcionamiento, si la embarcación se equipa con una hélice levógira y se desea ir hacia adelante, ésta

I. Introducción

avanzará hacia la derecha ya que la popa tenderá a ir hacia babor. Éste es el caso que se muestra en la imagen 15, donde se puede ver lo que se conoce como efecto evolutivo de la hélice. Si por el contrario se desea ir hacia atrás, la embarcación lo hará en sentido contrario.

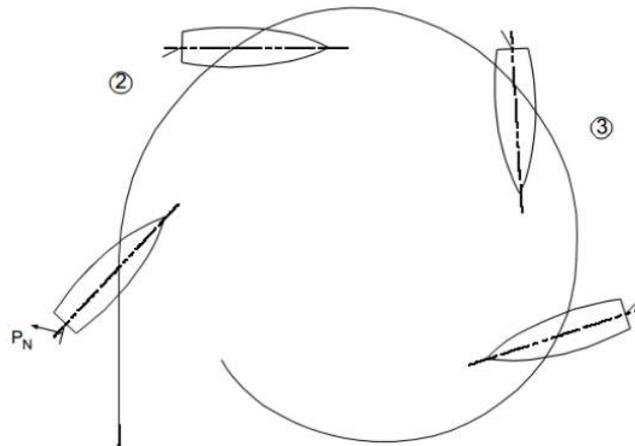


Figura I.13.- Caso de una embarcación avanzando con una hélice levógira

En el caso de utilizar una hélice dextrógira, se experimentará la situación contraria. El barco al avanzar tenderá a girar a la izquierda ya que la popa girará a estribor, mientras que si se retrocede la popa girará a babor yendo el barco hacia la derecha.

UNIDADES DE MEDIDAS NÁUTICAS

Ya que en el mundo marítimo no se usan las unidades del Sistema Internacional, sino que se emplean las del sistema americano, se van a establecer las equivalencias al sistema métrico que son las que se utilizarán a lo largo del trabajo.

Las unidades que acompañan a los valores de distancia son las millas náuticas, pies o pulgadas. Su equivalente en metros es:

I. Introducción

1 milla náutica = 1852 metros

1 pie = 0,3048 metros

1 pulgada = 0,0254 metros

Por otro lado, la velocidad viene expresada en nudos que es aproximadamente 1 milla por hora:

1 nudo \simeq 1 milla por hora \simeq 0,5 metros por segundo \simeq 1,8 kilómetros por hora

I. Introducción

I. Introducción

I.2. SELECCIÓN DE LA HÉLICE

Como se ha podido observar existe diversas opciones a la hora de elegir un motor o hélice de una embarcación. Para el presente trabajo se ha optado por un **motor Honda BF5A**, que se muestra en la imagen 16. Se trata de un motor fueraborda utilizado por embarcaciones de no más de 8 metros de eslora, por lo que es ideal para embarcaciones tales como barcos auxiliares, canoas, pequeños botes de pesca o veleros.

Algunas de las características del motor son:

Tipo de motor → OHV (acrónimo de la palabra inglesa “Overhead valve”, cuyo significado es válvulas en culata) de 1 cilindro.

Cilindrada → 127 cm³

Revoluciones del motor → Entre 4500 y 5500 revoluciones por minuto.

Potencia nominal → 3,7 kilovatios (5 caballos de vapor).

Sistema de refrigeración → Por agua ya que utiliza termostato.

Relación de cambio → 2,08

Velocidades → Adelante, Neutro, Retroceso.

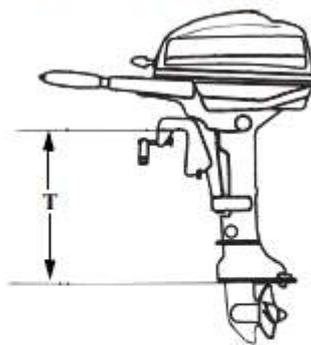
I. Introducción



Figura I.14.- Motor fueraborda Honda BF5A, equipada con la hélice

Además, el fabricante recomienda que la hélice que suele proveer junto a este motor sea una hélice de aluminio con 3 álabes. Otro dato que ofrece es que esta hélice se sitúa a unos 50 centímetros de profundidad aproximadamente si tomamos como referencia la altura del peto de popa. Como se ve en la figura, la parte de arriba del peto es donde va anclado al espejo de la popa y, por tanto, es una zona que limita con la línea de flotación de la embarcación. Esta altura además se toma hasta un punto muy próximo a la punta del álabe de la hélice, por lo que esta altura es una medida aproximada sobre a cuánta profundidad se encuentra la hélice.

Altura del peto de popa



Tipo:	T (Altura del peto de popa del motor fuera de borda)
S:	434 mm
L:	561 mm

Figura I.15.- Profundidad aproximada según rango del peto (Información ofrecida en el Manual de Usuario de Honda)

I. Introducción

En la próxima página se podrá ver en la imagen 18 a la hélice desde una vista frontal, y así tener un punto de referencia para realizar el primer modelo de la hélice. Otra información importante que Honda Marine muestra son tanto el diámetro como el paso de la hélice en pulgadas. A continuación, se exponen estas medidas y sus respectivas equivalencias en el sistema métrico:

Diámetro

$$7 \frac{7}{8} \text{ " } = 0,200025 \text{ metros } = 200,025 \text{ milímetros}$$

Paso (Pitch)

$$6 \frac{3}{4} \text{ " } = 0,17145 \text{ metros } = 171,45 \text{ milímetros}$$

I. Introducción

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo del presente trabajo es rediseñar una hélice modelo a la cuál se le harán modificaciones para mejorar su comportamiento en un medio acuático.

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

Diseñar un modelo inicial a partir de la escasa información dada por el fabricante.

Analizar la relación del agua con la hélice cuando esta gira mediante simulaciones de fluidos.

Rediseñar la hélice con el objetivo de mejorar la repartición de presiones en toda la pieza.

Seleccionar un material y proceso de fabricación adecuado a la compleja geometría de la hélice.

Comprobar la viabilidad económica de fabricar el diseño realizado

II. Objetivos

III. DESARROLLO PROYECTO

**DESARROLLO
PROYECTO**

III. Desarrollo proyecto

III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS.

En este primer modelo se ha imitado la hélice original ya que se dispone únicamente de dos medidas para poder hacer un diseño más real. Con este objetivo se ha tomado de referencia el diámetro de la hélice y el paso de la hélice proporcionado por el fabricante.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, para diseñar esta pieza y realizar tanto la otra alternativa de diseño de la hélice, como las simulaciones de flujo y cargas, se va a utilizar la herramienta CAD, SolidWorks.

En la primera etapa del diseño se realizó el diseño exterior del núcleo de la hélice. Para ello, se hizo un croquizado del perfil del núcleo de la hélice, como se refleja en la siguiente imagen. Después, se operó una revolución .

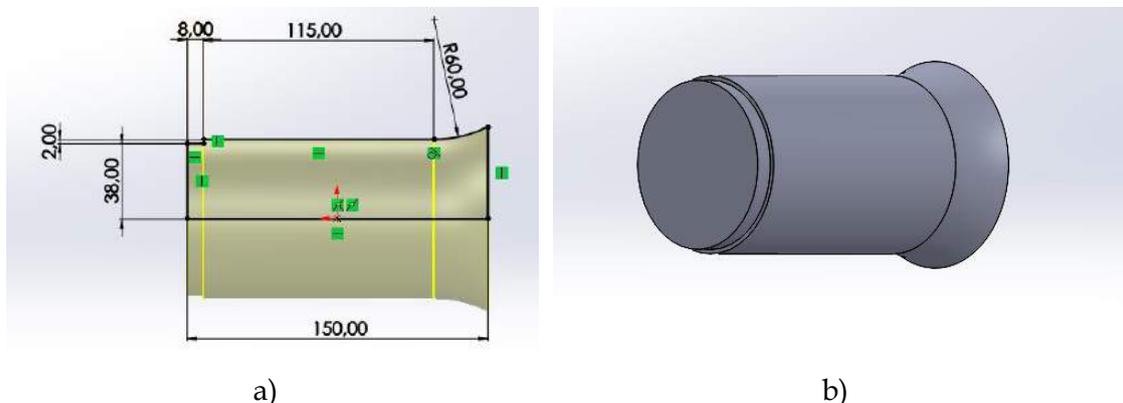


Figura III.1. a) Definición de las medidas del perfil del núcleo de la hélice, b) vista del núcleo después de la revolución total de base.

Después, fue el paso de realizar las palas de la hélice. Para conseguir que el álabe tuviera un mayor área útil para lograr un mayor empuje cuando girara se creó un plano en el que esbozar el perfil del álabe. Este plano está situado a 150° respecto a la vista lateral del núcleo de la hélice, y es coincidente al eje de giro de la hélice. Por otro lado, el

III. Desarrollo proyecto

croquis del álabe que aparece en la siguiente figura, se realizó utilizando splines para conseguir esas formas onduladas propias de las hélices, intentando que mantuviera esa forma característica de aleta de tiburón. A continuación, se extrusionó con un espesor de 5 milímetros, dato a tener en cuenta ya que es una variable que afecta críticamente a las deformaciones como veremos en el análisis de cargas.

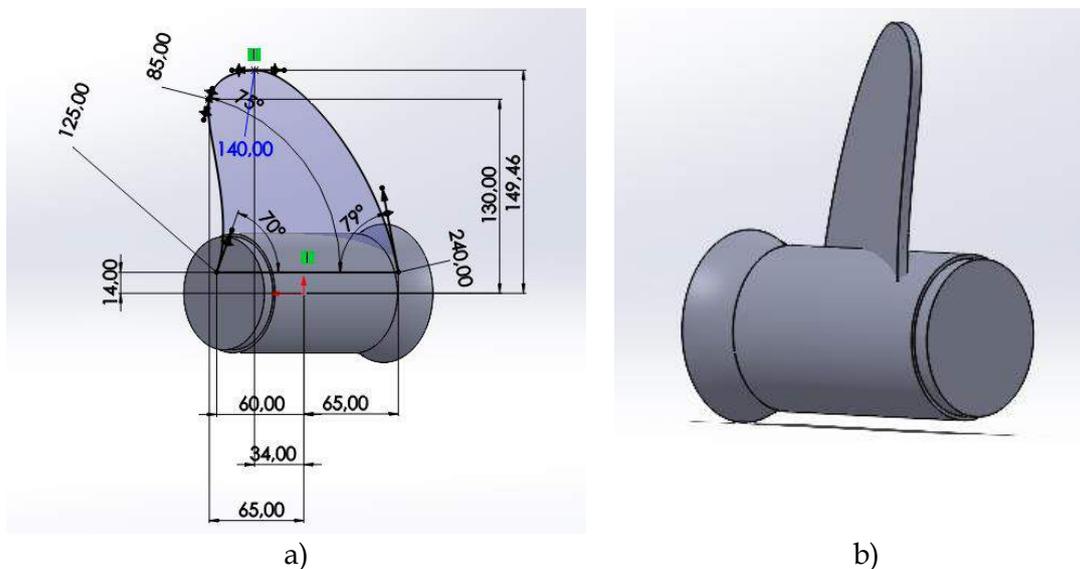


Figura III.2. a) Geometría definida del perfil del álabe, b) resultado de la pala de la hélice tras realizar la extrusión de 5 mm.

Además, se realizó una flexión en los álabes para lograrlo y con el propósito de tener un mayor apoyo para las presiones que se crean cuando la embarcación gira. En la siguiente figura se muestra la diferencia entre el antes y el después de realizar esta flexión. Por último, se operó una matriz circular para conseguir los 3 álabes equidistantes deseados, a 120°.

III. Desarrollo proyecto

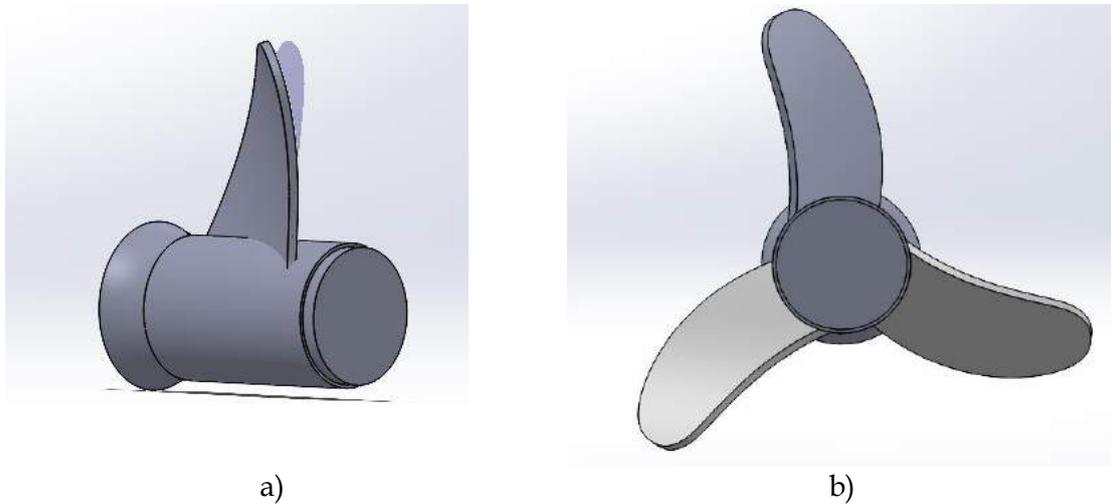


Figura III.3. a) Comparativa entre la posición inicial del álabe en sombreado, y el álabe tras realizar la flexión que garantice un mayor apoyo b) vista de la hélice después de realizar una matriz circular que equidiste 3 álabes a 120°.

Posteriormente, se realizó una serie de vaciado y cortes en el núcleo para ahuecarlo y así poder trabajar en el diseño interior de la hélice. El objetivo era crear una zona donde acoplar el eje que une el motor a la hélice ya que éste es el encargado de transmitir el movimiento rotatorio. Por este motivo, se creó un cilindro con hendiduras que encajasen al eje y lo fijaran a la hélice, y al igual que los álabes se realizaron 3 apoyos para este cilindro.

Para obtener esta estructura interna, se extruyó un cilindro con una base cilíndrica de 50 mm de diámetro que abarcara casi en totalidad la longitud del núcleo de la hélice. Después, se creó el primer apoyo gracias al esbozo de un rectángulo que limitara con el cilindro creado y la pared interna del núcleo. Como se puede ver en la figura 4, al igual que en el caso de los álabes, se matrizó circularmente la operación de extrusión de los tres apoyos deseados. Para acabar esta estructura interna, se hizo los cortes al cilindro principal creando unas hendiduras. El boceto utilizado tiene un aspecto de cruz, como aparece en la imagen 5, dejando así cuatro apoyos en los que el eje puede fijarse.

III. Desarrollo proyecto

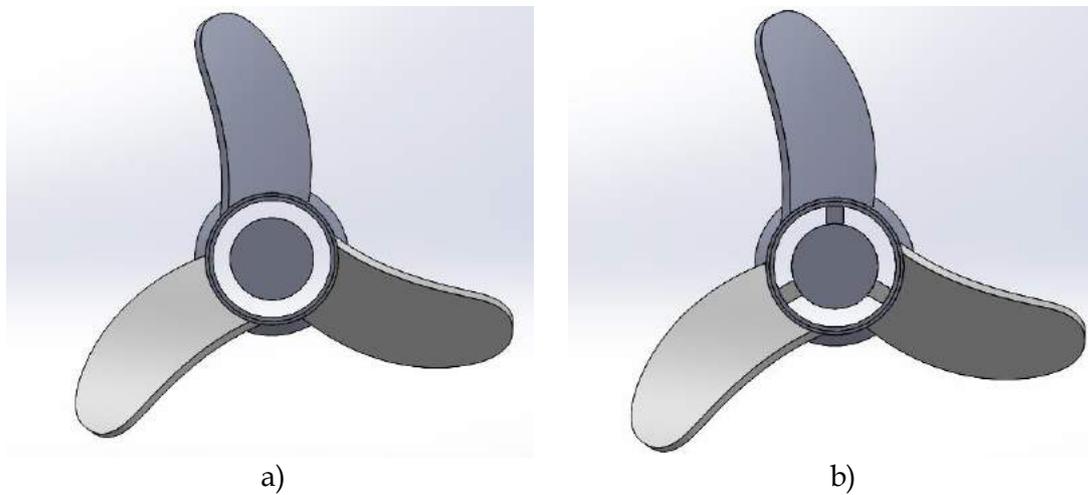


Figura III.4. a) Vista frontal de la hélice tras realizar el vaciado interior y el cilindro que forme base de su estructura interna b) vista de la hélice después de realizar la extrusión del apoyo interno y la matriz circular.

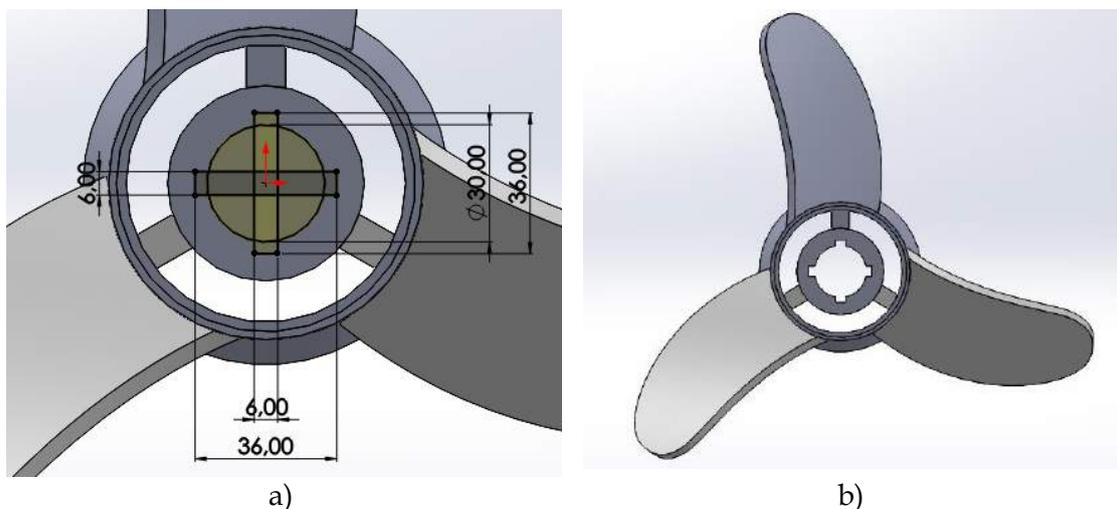


Figura III.5. a) Vista ampliada del croquis realizado para crear la zona de ajuste con el eje que une la hélice con el motor b) vista frontal de la hélice después de realizar el corte que crea las hendiduras interiores del cilindro interior del núcleo.

Para obtener unas uniones entre superficies más curvas y así evitar tensiones críticas y lograr un paso del fluido más dinámico, se han realizado diversos redondeos y chaflanes como se pueden visualizar en la siguiente figura. Como se puede ver en la siguiente figura, algunas zonas afectadas por estos redondeos fueron la unión de las

III. Desarrollo proyecto

caras activa y pasiva de los álabes y la unión de éstos al núcleo de la hélice, y en segundo lugar, la estructura interna del núcleo, especialmente en los apoyos y cilindro interno.

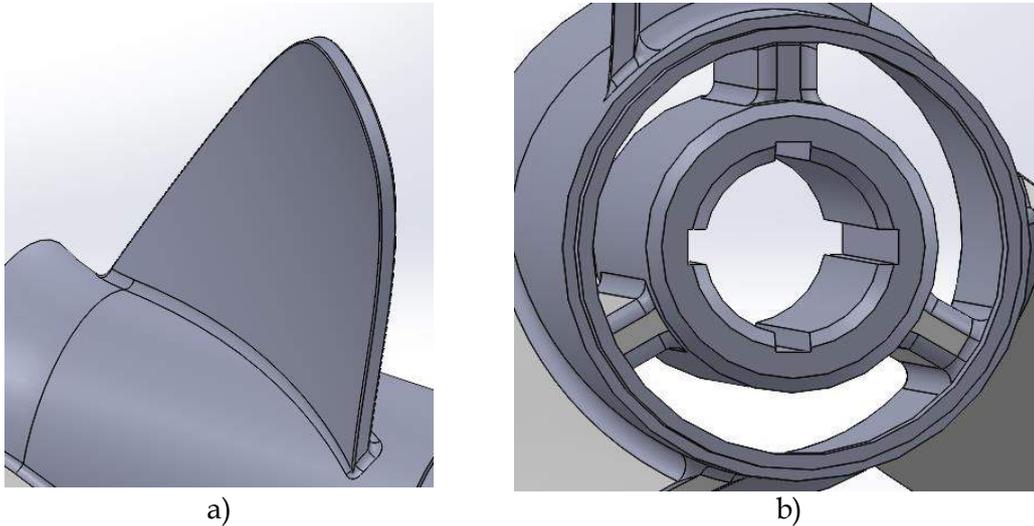


Figura III.6. a) Vista ampliada de la hélice tras realizar redondeos tanto en su base como en la unión de las caras activa y pasiva con el perfil lateral b) vista ampliada de la estructura interna del núcleo de la hélice tras realizar chaflanes al cilindro interno y redondeos en los apoyos de ésta.

A continuación, se realizó un croquis con el diámetro de hélice que debe tener el modelo para cumplir con las dimensiones dadas por Honda. Como el diseño que se estaba haciendo era mucho más grande y el diámetro de hélice también era mayor, se utilizó la herramienta escalar para hacer coincidir la punta de las palas con la circunferencia creada y así conseguir los requerimientos del fabricante.

Una vez lograda esta geometría, se esbozó el perfil del capavete mediante líneas splines como se muestra en la siguiente figura, y se realizó una revolución de base para alcanzar la forma de punta cónica característica de esta parte de la pieza.

III. Desarrollo proyecto

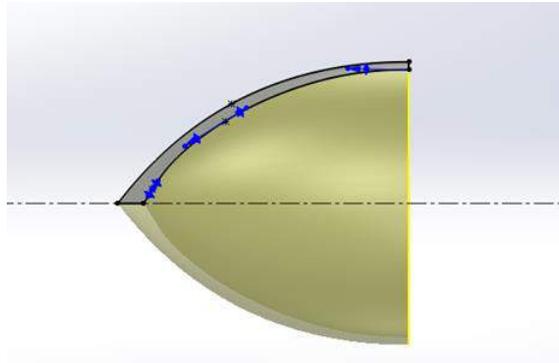


Figura III.7. Capacete diseñado a partir de un croquis con splines y con una operación de revolución de base.

El último paso fue comprobar que el paso de la hélice fuese el indicado por el suministrador de la hélice se procedió a hacer una operación de hélice/espiral que indicando el diámetro de la pieza nos retornara el paso de hélice correcto. Se realizó de tal manera que el dibujo de la hélice partiera de la punta del álabe. En la siguiente figura se puede verificar que los datos son los correctos.

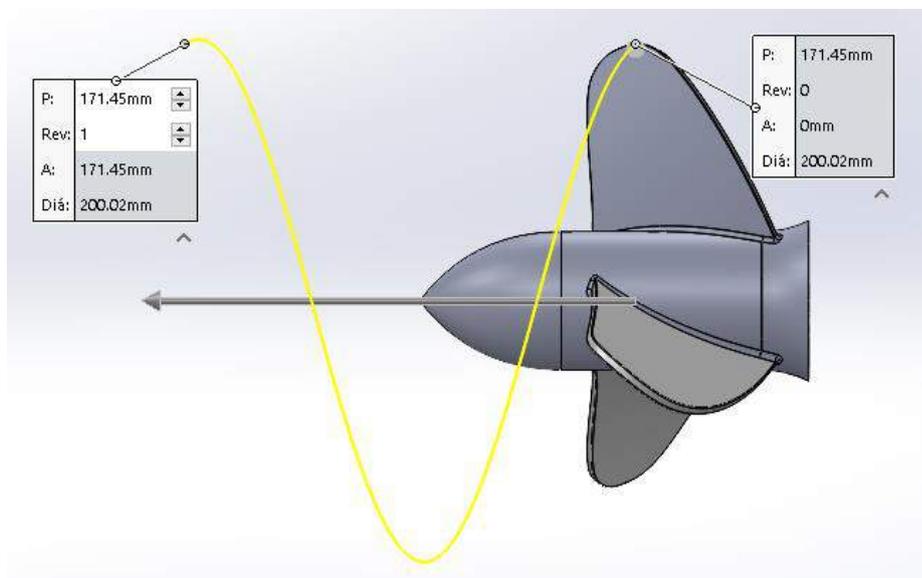


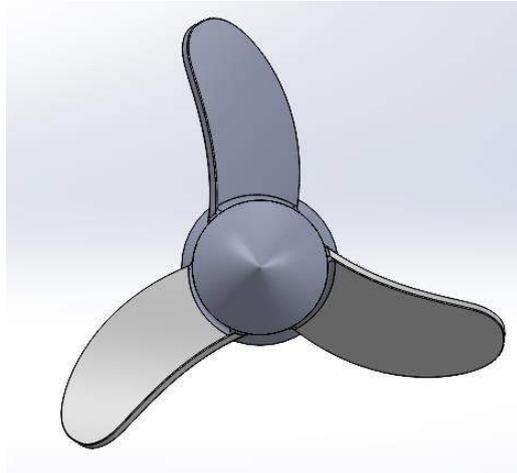
Figura III.8. Operación de hélice/espiral hecha para comprobar que las dimensiones de la pieza cumplen con las demandas del fabricante.

III. Desarrollo proyecto

Tras realizar el modelo inicial de la hélice, se va a mostrar una comparativa del diseño que ofrece Honda a sus clientes con el diseño logrado tras el uso de SolidWorks.



a)



b)

Figura III.9. a) Imagen de la hélice suministrada por Honda para su motor BF5A. b) Vista frontal del diseño del modelo inicial de la hélice.

Como se puede observar, la primera diferencia que hay es que en la Figura III.8. a), a la hélice le falta el capacete. Además, la forma de los álabes tiene una ligera mayor área, aunque es cierto que el ángulo al que se ha tomado la fotografía puede inducir a exagerar esta diferencia.

Para más información de la pieza modelada, consultar la HÉLICE v1 (ANEXO 1) o el Plano de la HÉLICE v1 (ANEXO 2).

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.2. NORMATIVA APLICABLE.

La normativa que se ha tenido en cuenta para la realización del presente trabajo y otras normas existentes que son recalables mencionar, aunque no haya terminado de aplicarse es la siguiente:

UNE-EN ISO 3715-1: Esta norma hace referencia al vocabulario utilizado relativo a la geometría de las hélices. En ella establece el sistema de coordenadas cilíndricas y rectangulares para la definición de la geometría y, después define una lista de términos relacionados con una hélice marina.

UNE-EN ISO 3715-2: Esta normativa está centrada en definir terminología relacionada con hélices del tipo paso controlable.

UNE-EN 13195: Esta norma habla sobre los aspectos técnicos que hay que considerar cuando se realiza un suministro de productos moldeados o forjado de aluminio o aleaciones de éste, especialmente centrados en productos para ambientes marinos.

UNE-EN 683-3: Este documento describe las tolerancias dimensionales y de forma para aletas fabricadas en aluminio o aleaciones de aluminio, utilizando la forja como proceso de fabricación.

ISO 19030-1: Esta norma explica cómo se hace la medición de la variación en el rendimiento del casco de la embarcación y de la hélice por diferentes métodos.

III. Desarrollo proyecto

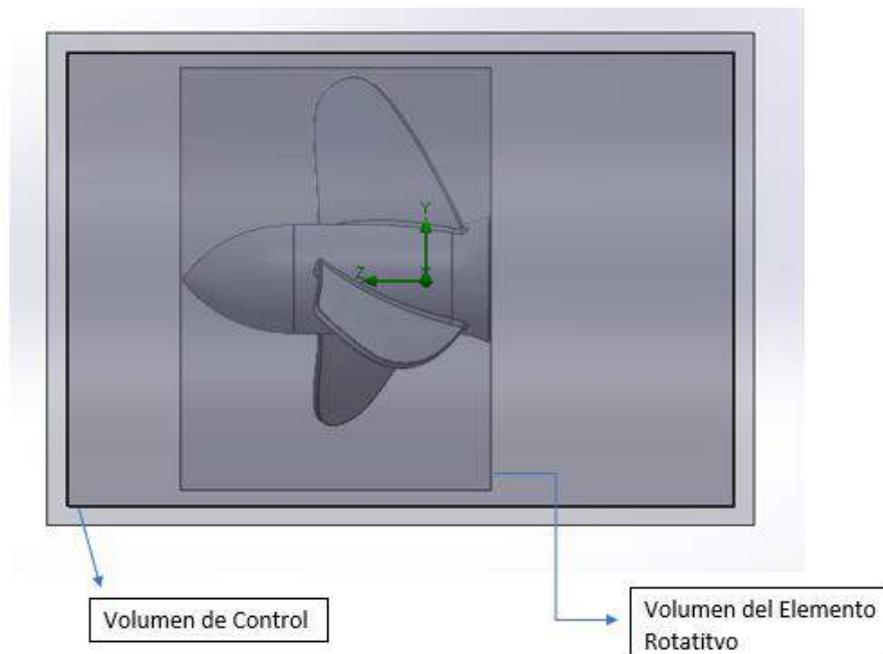
III. Desarrollo proyecto

III.3. ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO DEL MODELO INICIAL.

Para lograr un estudio del flujo dinámico más realista, se ha creado un ensamblaje para poder tener las diferentes partes involucradas en esta área. Como se puede ver en la figura 9, además de la pieza de la hélice se han establecido dos piezas más para que hagan cada una la función de un tipo de volumen.

El primer volumen es el conocido como volumen de control, que contendría el agua y, por supuesto, nuestra hélice. Se trata de un cilindro que envuelve la hélice dejando holgura suficiente para visualizar mejor la trayectoria del fluido tras la simulación.

El segundo volumen se utilizará como volumen rotativo, el cual nos ayudará a simular una hélice girando y se verá qué efectos tiene este movimiento circulatorio en el fluido y en la pieza.



III. Desarrollo proyecto

Figura III.10. Ensamblaje constituido por la hélice, el volumen de control y el volumen del elemento rotativo, que servirá de apoyo para simular la dinámica de flujo.

Una vez se está en el apartado de *Flow simulation* de SolidWorks, y ya hablando del proyecto de la simulación, nombrada simulación v1, se configuraron de esta manera los parámetros que caracterizan este cálculo:

El sistema unitario seleccionado ha sido el Sistema Internacional (m-kg-s). Aunque se ha modificado la longitud para que los resultados fueran expresados en milímetros ya que es la unidad con la que se ha realizado el diseño.

En tipo de análisis se ha indicado que éste es interno porque el fluido va a trabajar dentro del volumen de control. Además, se han excluido las cavidades sin condiciones de flujo. También se ha marcado que el análisis sea de rotación para luego poder añadir giro al volumen del elemento rotativo.

El fluido seleccionado ha sido el agua como líquido y se ha marcado la casilla de cavitación indicando el flujo sea de tipo laminar y turbulento.

La rugosidad del volumen de control será nula y sus paredes serán adiabáticas.

En parámetros termodinámicos, se apuntó que la presión no fuera 1 atmósfera sino más. Esto se debe a la presión hidrostática como ya se ha mencionado y, por tanto, se ha tenido en cuenta la longitud del peto de popa que como indicaba el fabricante. Se ha aproximado que la profundidad a la que debe estar la hélice es de medio metro. Esto quiere decir que, si se sabe que por cada 10 metros de profundidad la presión aumenta 1 atmósfera, por regla de tres, la presión a medio metro de profundidad es de 0,05 atmósferas. Así que la presión dentro del volumen de control tomándola como presión absoluta, es el resultado de la suma de la presión atmosférica más la presión hidrostática.

$$\textit{presión absoluta} = \textit{presión atmosférica} + \textit{presión hidrostática}$$

$$\begin{aligned}\textit{presión absoluta} &= 1 \textit{ atmósfera} + 0,05 \textit{ atmósfera} = 1,05 \textit{ atmósfera} \\ &= 106391,3 \textit{ Pascales}\end{aligned}$$

III. Desarrollo proyecto

Esta presión es la introducida como presión en el proyecto de la simulación.

Como temperatura se tomó el dato medio de la temperatura del mar en los últimos años, siendo ésta de 18°C o, lo que es lo mismo, 291,1 Kelvin.

Se observó que la dirección del fluido era paralela al eje Z según estaba situada la pieza. El sentido del flujo es de derecha a izquierda tomando el punto final el capicete de la hélice, ya que este está situado en orientación contraria a la proa. Además, comparando las velocidades que puede alcanzar otros motores con la misma potencia que el Honda BF5A, se ha decidido que la velocidad del fluido para la simulación fuera de unos 21,6 kilómetros por hora, que son 0,6 metros por segundo. Por tanto, esta será la velocidad introducida en valor positivo teniendo en cuenta los ejes en los que está orientada la hélice.

Tras la realización del proyecto, se definió de manera manual el número de células del mallado global, Global Mesh, para así poder adaptar un buen nivel de cálculo al procesador del ordenador utilizado. La malla básica se estipuló como: NX y NY igual a 14 células y se le dio un número mayor al eje Z ya que es la misma dirección de la que proviene el fluido. En este caso el número de células elegido es de NZ igual a 16. Para el refinamiento de las células se optó por un nivel 1 en el caso de las células de fluido y un nivel 2 para las células del límite de fluido.

Para que la hélice rotase, se seleccionó la opción Rotating Region, marcando la pieza creada del volumen del elemento rotativo. Se ha definido que la velocidad de rotación sea de 250 rad/s, unas 2400 revoluciones por minuto aproximadamente. Esto se debe a que el fabricante ha dado una velocidad de entre 4500 y 5500 revoluciones por minuto, pero para que la hélice no trabaje de forma ineficiente se tiene una relación de reducción a la mitad. Por tanto, esta velocidad está dentro de estos parámetros. El sentido de giro es el que se indica en la siguiente imagen.

III. Desarrollo proyecto

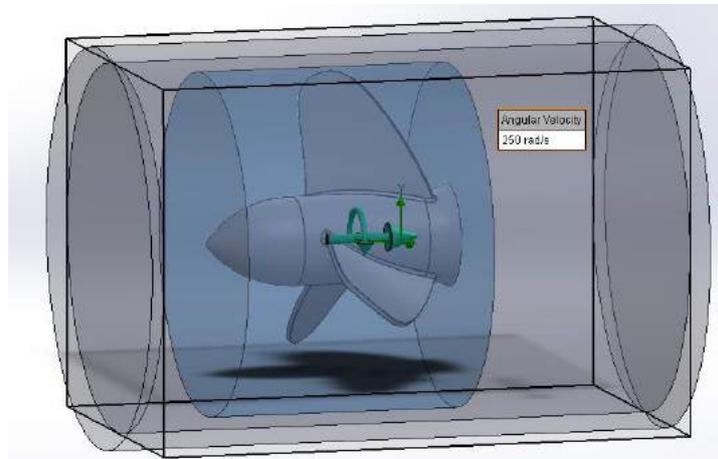


Figura III.11. Sentido de giro de la hélice en la simulación con el valor de la velocidad angular asignada.

Como condiciones límite, Boundary Conditions, se ha elegido la opción de presión ambiental para indicar cuál es el volumen de control seleccionando las caras interiores de éste. En la figura 11 se observa cómo el volumen de control no es solo un cilindro, sino que posee caras externas e internas que facilitan la selección a la hora de realizar la simulación.

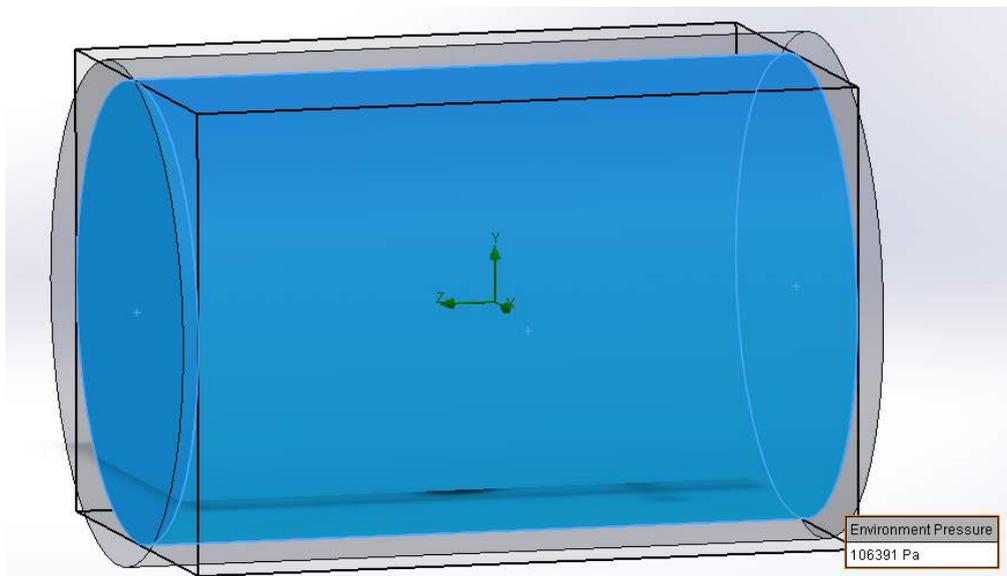


Figura III.12. Selección del volumen de control interno para definir la presión ambiente dentro de éste. Diferenciación entre caras externas e internas del volumen de control.

III. Desarrollo proyecto

Además, se le ha realizado un mallado local al volumen del elemento rotativo para que a la hora de realizar el cálculo la simulación ofrezca unos resultados de mayor calidad, ya que al tratarse de una simulación desarrollada en un ensamblaje hay resultados que puede dar a error. El refinamiento de las células se marcó como nivel 2 en el caso de las células de fluido y un nivel 3 para las células del límite de fluido. Además, se subió el nivel de refinamiento de los canales a 2.

Por último, en Input Data se indicó en las opciones de cálculo que éste realizara 250 iteraciones para obtener unos resultados fiables, pero que el tiempo invertido no fuese excesivo.

Una vez hecha la configuración de la simulación, ésta se ejecutó. Tras el tiempo de cálculo, se obtuvieron los resultados de la simulación del fluido. Para poder observar cómo trabaja la hélice y cómo es su relación con el fluido, se insertaron diferentes gráficos mostrando los resultados de diversas maneras. Para este proyecto, el estudio se ha centrado en observar cómo varía la distribución de presión sobre la hélice para después realizar el análisis de cargas.

En primer lugar, se hizo un corte de región, *Cut Plot*, tomando la vista lateral y un nivel 60 de contorno para poder apreciar la presión en esta zona. Se puede observar en la siguiente figura como el fluido cercano a las caras activas de los álabes está a mayor presión que en el caso de las caras pasivas, llegando estas zonas a valores de tan solo 53,14 Pascales. Por otro lado, el fluido cercano al extremo de la cara pasiva llega a valores por encima del doble de la presión ambiente del volumen de control, por lo que es una zona crítica donde podría llegar a producir deformaciones máximas en la punta de la pala, siendo además el punto más alejado del núcleo.

III. Desarrollo proyecto

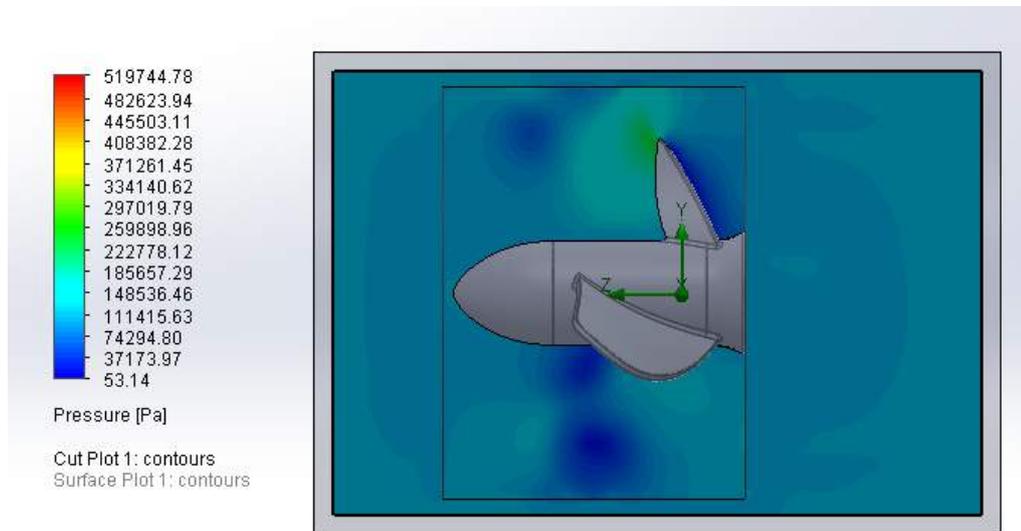


Figura III.13. Resultado de la simulación v1 mostrado como *Cut Plot*

Estas presiones se ven de manera más clara si se opta por la visualización de los resultados en la superficie de la hélice con la herramienta *Surface Plot*. Con ella se puede ver que el reparto de presiones en la cara pasiva del álabe es equitativo.

Por otro lado, en la cara pasiva se observa que sufre más la zona con el arco más pronunciado, mientras que en la punta de la pala hay bajas presiones. Esta variación de presiones puede suponer pérdidas en la eficiencia motriz debido a vibraciones.

El capacete es una zona que no muestra variaciones de presiones.

En el núcleo de la hélice se originan zonas de bajas presiones próximas a las caras pasivas de los álaves. Ésta puede ser una posible zona donde surgiera el fenómeno de la cavitación.

III. Desarrollo proyecto

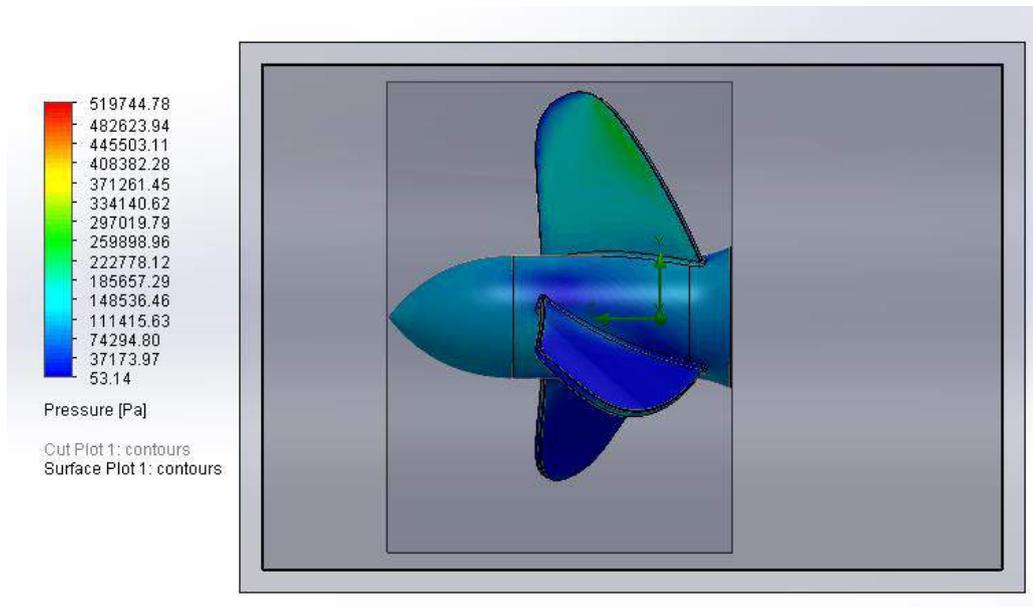


Figura III.14. Resultado de la simulación v1, mostrando los valores de presiones en la superficie de la hélice tras insertar un *Surface Plot*.

Por último, se ha analizado la velocidad del flujo en el eje Z mediante *Flow Trajectories*. Para ello, se ha tomado las caras laterales del cilindro que forma el volumen de control como la entrada y salida del fluido. Para una visualización óptima se optado por un número de 100 puntos, y que muestre flechas de 2 milímetros.

Como se puede observar en la imagen, la velocidad máxima del fluido se logra tras el paso del álabe ya que éste es el encargado de impulsar el agua, y tras este empuje la velocidad del fluido aumenta. También se puede ver algún vórtice con fluido a baja velocidad que se puede deber o a un alto nivel de giro que cree un efecto de succión donde el fluido a mayor velocidad empuje al que circule más despacio.

Además, se ve como el fluido tras empezar a ir en paralelo al eje de giro de la hélice, cuando se acerca a ésta la trayectoria de las flechas tienden a ir al centro debido a la fuerza centrípeta que la hélice genera cuando rota.

III. Desarrollo proyecto

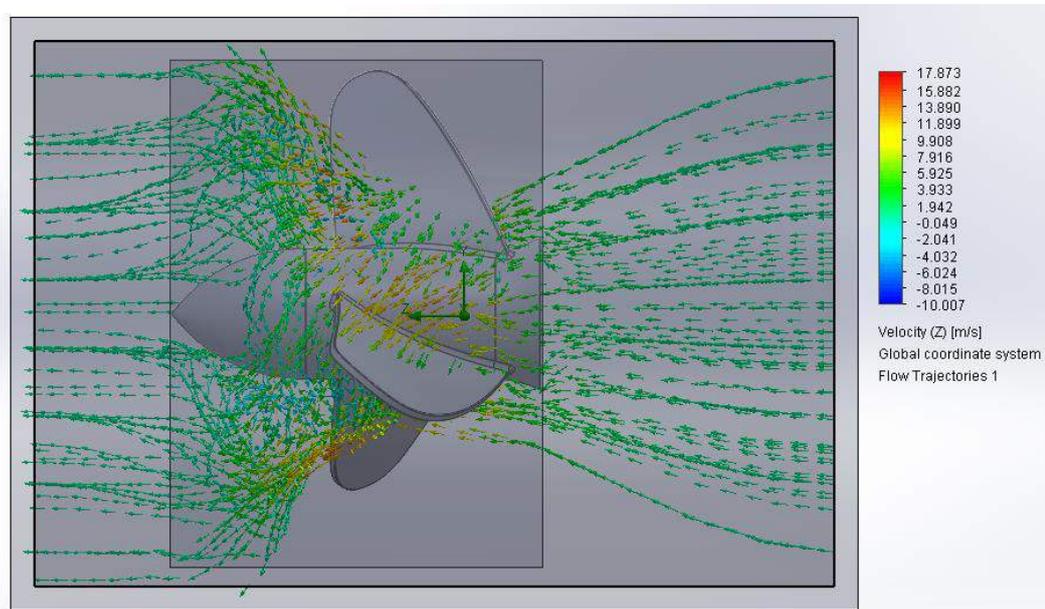


Figura III.15. Visualización de la velocidad del flujo en la dirección del eje Z y de la trayectoria del fluido en su contacto con la hélice

III. Desarrollo proyecto

III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES.

Se sabe que el material que Honda recomienda en la fabricación de la hélice que suministra es el aluminio.

Para poder seleccionar un tipo en concreto de este tipo de material hay que tener en cuenta que debe cumplir con ciertos requerimientos tales como: una buena resistencia a la corrosión, una densidad baja, un módulo de Young adecuado para aportar la rigidez necesaria especialmente en zonas como los álabes, que es la parte de la hélice que más sufre, y que tenga posibilidad de adaptarse a diferentes procesos de fabricación.

Como ya se ha comentado, se va a hacer uso de la base de datos del programa Granta Edupack como apoyo para realizar la selección del material. Pero en primer lugar se va a exponer las diferentes series de aluminio y sus características:

SERIE 1000

En esta serie tenemos un material que es casi en su totalidad aluminio. Las propiedades que presenta son muy buena resistencia a la corrosión, y su excelente conductividad térmica y eléctrica, además de su facilidad de trabajo.

SERIE 2000

Este aluminio destaca por su poco peso y dureza. Se suele alea con cobre, pero si lo que se busca es disminuir más el peso y mejorar sus propiedades mecánicas, se hace una aleación junto a magnesio y manganeso. El inconveniente que presenta es su muy mala resistencia a la corrosión.

SERIE 3000

En este caso, se crea la aleación de aluminio junto a un mayor porcentaje de manganeso cosa que reduce la ductilidad pero que mejora la resistencia mecánica.

III. Desarrollo proyecto

SERIE 4000

En esta serie de aluminio se prioriza la resistencia al desgaste y es por eso que forma parte de la aleación de manera más destacada el silicio, aunque también se suele ver junto a otros metales como cobre o magnesio.

SERIE 5000

Esta clase de aluminio destaca por su soldabilidad y muy buena resistencia a la corrosión y fusión. El elemento principal de la aleación a parte del aluminio es el magnesio, que le aporta ductilidad al material. Esta serie está pensada para el trabajo en frío y así pueda mejorar sus propiedades mecánicas.

SERIE 6000

La aleación de esta serie está formada con silicio y magnesio. Después de un postprocesado térmico, sus propiedades mecánicas no mejoran a las de la serie 2000. No obstante, presenta buenas propiedades de procesamiento como su capacidad de corte, soldabilidad, conformabilidad y capacidad de trabajo. Presenta una buena resistencia mecánica y una alta resistencia a la corrosión.

SERIE 7000

En este caso el elemento principal en la aleación además del aluminio es el zinc, aunque se suele añadir magnesio para mejorar la resistencia a la corrosión. Tiene una alta capacidad de trabajo, pero mal comportamiento a ser soldado por fusión.

Teniendo en cuenta todas estas propiedades se va a confeccionar una tabla comparativa que evalúe las características de procesamiento con cada serie de aluminio:

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.1. Tabla comparativa de las distintas series de aluminio frente a distintos tratamientos. Se evaluará con estas 4 calificaciones: Muy Buena (MB), Buena (B), Mala (M), Muy Mala (MM)

Tabla 1.- Comparativa entre las distintas series de aluminio

	Conformabilidad	Soldabilidad	Mecanizado	Resistencia a la Corrosión	Tratamiento Térmico (SÍ/NO)
SERIE 1000	MB	MB	B	MB	NO
SERIE 2000	B	MM	B	MM	SÍ
SERIE 3000	MB	MB	B	B	NO
SERIE 5000	B	B	M	MB	NO
SERIE 6000	B	B	M	B	SÍ
SERIE 7000	MM	MM	M	M	SÍ

Tras esta comparación de materiales, se puede establecer que las dos series que más interesan para la pieza que se está trabajando son la Serie 1000 y Serie 5000.

Si se comparan propiedades mecánicas como el límite elástico, la Serie 1000 suele ser peor que la Serie 5000 en lo referido a esta característica. Además, la Serie 1000

III. Desarrollo proyecto

normalmente acompaña a su procesado un tratamiento posterior para mejorar sus características mecánicas, y esto hace que el coste final se encarezca.

Por tanto, el aluminio seleccionado formará parte de la Serie 5000.

Utilizando el programa Granta Edupack se va a realizar un filtrado de materiales para encontrar el aluminio de serie 5000 más barato y que tenga un límite elástico superior, además de tener un buen comportamiento con el agua salada. También se ha indicado que solo muestre aleaciones de aluminio.

Para alcanzar el resultado deseado se ha ido variando el valor mínimo para el límite elástico y el valor máximo para el precio. Finalmente, se obtuvo el aluminio que se estaba buscando gracias al filtrado que se muestra en la figura siguiente.

Price		Mínimo	Máximo	
		<input type="text"/>	<input type="text" value="2"/>	EUR/kg
Young's modulus	Existe	Mínimo	Máximo	GPa
		<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Specific stiffness		<input type="text"/>	<input type="text"/>	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)		<input type="text" value="390"/>	<input type="text"/>	MPa
▼ Durability				
Water (fresh)		<input type="text"/>		
Water (salt)		<input type="text" value="Acceptable; Excellent"/>		

Figura III.16. Valores introducidos para buscar un aluminio barato y con suficiente límite elástico

Esta búsqueda dio 16 resultados, todos ellos de la serie 2000 excepto el aluminio 5182-H19. El resumen final de la selección de material se puede ver en la figura 15, donde se muestra la primera etapa de selección que ya se ha mostrado en la imagen anterior, y la segunda etapa de muestra de aluminios. Por último, se pueden ver todos los resultados que Granta Edupack ha dado.

III. Desarrollo proyecto

The screenshot shows a software interface for material selection, organized into three main sections:

- 1. Datos para la selección:** Includes a dropdown for 'Base de datos: Level 3' with a 'Cambiar...' button, and a dropdown for 'Seleccionar de: MaterialUniverse: Metals'.
- 2. Etapas de selección:** Features three tabs: 'Gráfico/Índice', 'Límite', and 'Árbol'. Below the tabs, two selection steps are listed with checkboxes: 'Etapa 1: Price, Yield strength (elastic limit), Water (salt)' and 'Etapa 2: Aluminum', both of which are checked.
- 3. Resultados: pasan 16 de 1915:** Includes a 'Mostrar:' dropdown set to 'Pasan todas las etapas' and a 'Clasificar por:' dropdown set to 'Orden alfabético'.

Below these settings is a list of 16 aluminum materials, each with a small icon and the text 'Nombre' above the list:

- Aluminum, 2014, T6
- Aluminum, 2014, T62
- Aluminum, 2014, T651
- Aluminum, 2014, T6510
- Aluminum, 2014, T6511
- Aluminum, 2014, T652
- Aluminum, 2024, T36
- Aluminum, 2024, T81
- Aluminum, 2024, T851
- Aluminum, 2024, T8510/T8511
- Aluminum, 2024, T861
- Aluminum, 2026, T3511
- Aluminum, 2124, T851
- Aluminum, 2519, T87
- Aluminum, 2618A, T6
- Aluminum, 5182, H19

Figura III.17. Resumen de la selección de material para el modelo inicial de la hélice

El aluminio 5182-H19 tiene las siguientes características:

Densidad: 2630-2680 kg/m³

Módulo de Young: 68,5-72,1 GPa

Límite Elástico: 373-413 MPa

III. Desarrollo proyecto

Coeficiente de Poisson: 0,32-0,34

Tenacidad: 12,9-18,3 kJ/m²

III. Desarrollo proyecto

III.5. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO.

La hélice es un elemento que rota gracias al eje de giro que la conecta con el motor. Este eje es el único componente, además del agua, que interactúa directamente con la pieza. Es por ello por lo que a la hora de realizar el diseño se creó una estructura interna del núcleo de la hélice para que pudiese fijarse este eje.

Se recuerda que en esta estructura interna había un cilindro interno que es el que sujeta a la hélice y para tener el acoplamiento necesario se crearon unas hendiduras para lograr un encaje óptimo. Por tanto, serán estas hendiduras y la cara interna del cilindro las zonas de contacto con el eje. Esta parte de la hélice se puede observar con claridad en la Figura III.5. b) .

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.6. SIMULACIÓN MEDIANTE FEM DEL MODELO INICIAL DE LA HÉLICE.

III.6.1. Modelo FEM proyecto.

Para el análisis de cargas se ha utilizado la herramienta Simulation de SolidWorks. En ella se ha realizado un estudio de análisis estático de la hélice únicamente, por lo que las piezas de volumen de control y el volumen del elemento rotativo han sido excluidas del cálculo.

Como características del estudio se ha indicado que se mantengan como zona fija las paredes interiores de las hendiduras creadas dentro del cilindro interior del núcleo de la hélice ya que es donde permanecerá el eje como ya se ha mencionado.

III.6.1.1. Aplicación de estados tensionales.

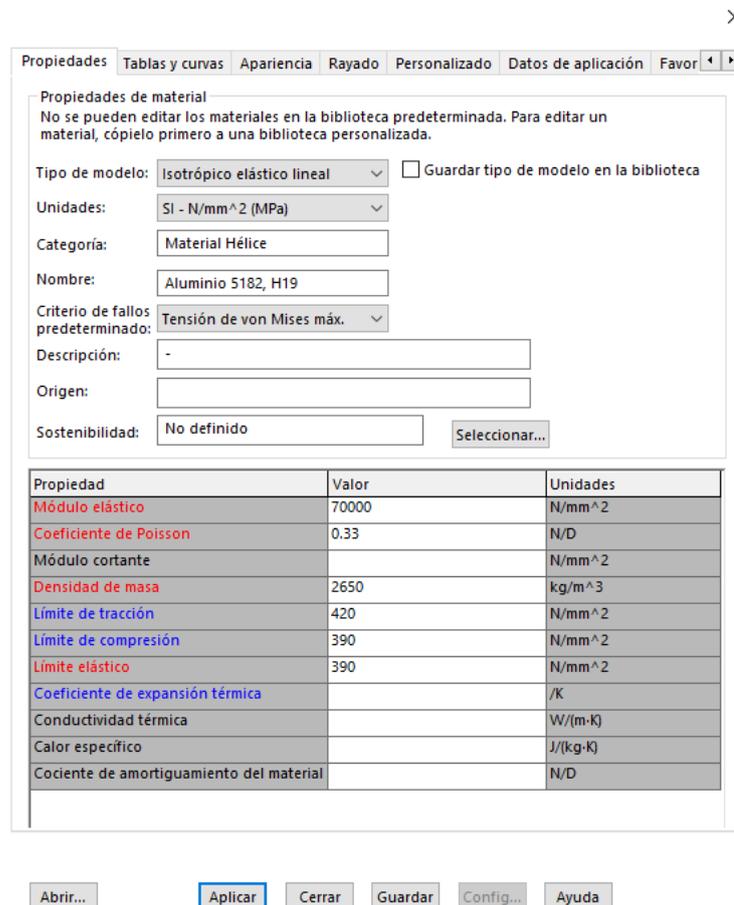
Como carga externa se ha elegido una presión uniforme que actúe en las caras activas de los álabes, siendo ésta la que tiene zonas pintadas de verde. La elección de estas caras se debe a que es la que soportan mayor presión. Como valor de esta presión se ha tomado como referencia el número indicado en la escala de colores y valores mostrada en la visualización del Surface Plot, teniendo una presión de 334140,62 Pascales (o N/m²).

III.6.1.2. Aplicación de materiales.

El aluminio 5182-H19 ha sido aplicado a la hélice manualmente y se ha introducido a la base de materiales de SolidWorks utilizando los datos ofrecidos por Granta Edupack. Como se puede observar en la siguiente figura, se han añadido

III. Desarrollo proyecto

características como el límite elástico, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo cortante, densidad de masa, límite de tracción y compresión...



Propiedades de material

No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: Material Hélice

Nombre: Aluminio 5182, H19

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción: -

Origen:

Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	70000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante		N/mm ²
Densidad de masa	2650	kg/m ³
Límite de tracción	420	N/mm ²
Límite de compresión	390	N/mm ²
Límite elástico	390	N/mm ²
Coeficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m-K)
Calor específico		J/(kg-K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura III.18. Propiedades del aluminio 5182-H19, introducido en la base de materiales de SolidWorks

III.6.2. Análisis de estados tensionales y deformaciones.

Los resultados tras realizar el estudio muestran como las tensiones encontradas en la hélice no rebasan el límite elástico del material. Además, se van a mostrar las imágenes de los desplazamientos y deformaciones unitarias que han sido calculadas.

III. Desarrollo proyecto

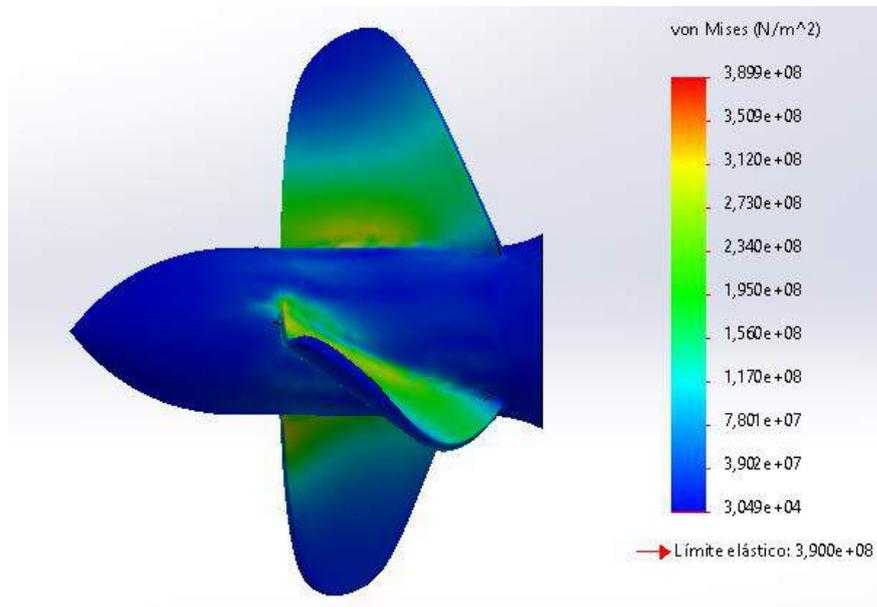


Figura III.19. Resultado de las tensiones según VonMises de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19

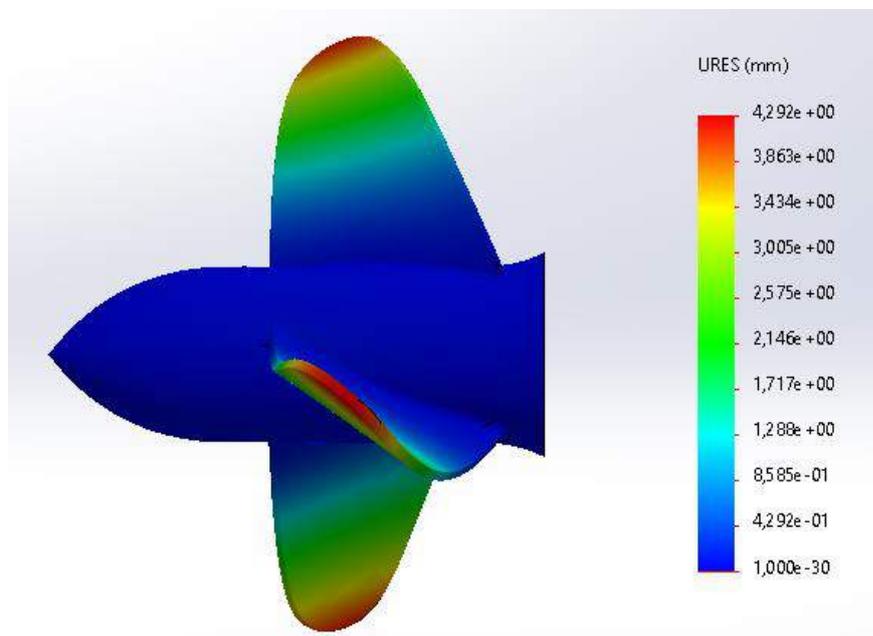


Figura III.20. Resultado de los desplazamientos de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19

III. Desarrollo proyecto

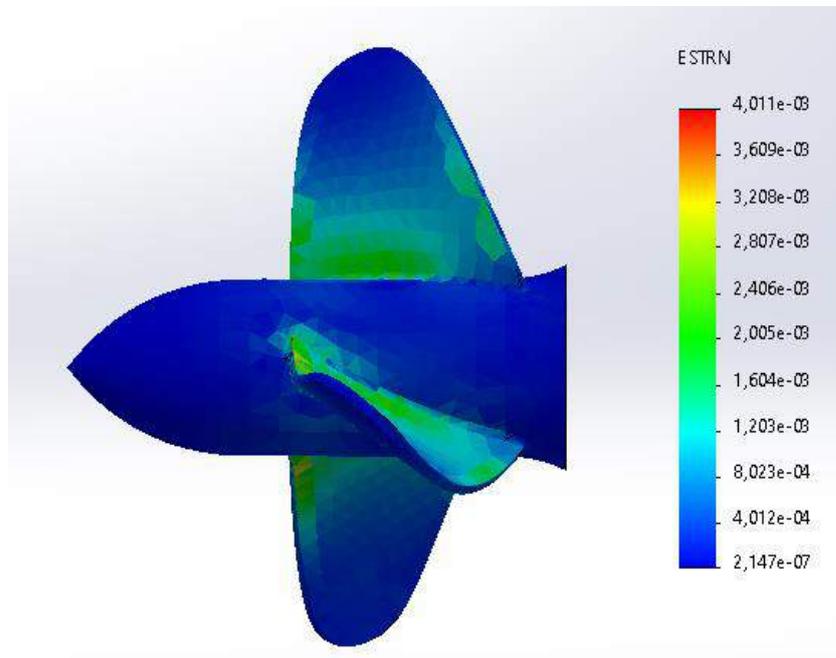


Figura III.21. Resultado de las deformaciones unitarias de la HÉLICE v1 con Aluminio 5182-H19

De estos resultados se pueden deducir diversas conclusiones. En primer lugar, que el material seleccionado cumple a cargas estáticas ya que ninguna de sus propiedades queda por debajo de lo solicitado.

En la imagen que muestra el cálculo del estado tensional, se puede observar como la zona de mayor tensión se encuentra en los álabes, más en concreto en su unión con el núcleo de la hélice. El álabes además de ser la parte de la hélice que más trabaja cuando gira, es un elemento prácticamente perpendicular al núcleo, lo que hace que la zona de intersección de ambas partes sea la que más sufra. Posiblemente de no haberse operado un redondeo en esta unión se debería haber cambiado de material con un límite elástico mayor para intentar paliar estas tensiones críticas.

En lo referente a los desplazamientos, la zona donde mayor incidencia tiene este fenómeno es en la punta de las palas. Esto se debe que es la parte más alejada al centro de la pieza y la que tiene menor apoyo. El momento en el extremo del álabes es el de mayor valor que experimenta la hélice, y esto puede hacer que los álabes se flexionen cuando giren.

III. Desarrollo proyecto

En cuanto a lo que se refiere a las deformaciones unitarias, viendo los resultados sobre la hélice se observa como las zonas de mayor deformación vuelve a ser la unión del álabe con el núcleo de la hélice, aunque en este caso las deformaciones son ínfimas ya que como muestra la escala de colores todos son valores cercanos a la milésima, por tanto, se puede decir que la hélice no padece deformaciones unitarias importantes a lo largo de su geometría.

Toda la información referente a los cálculos y simulaciones realizadas se encuentra en la SIMULACIÓN DE FLUJO v1 (ANEXO 3).

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.7. DISEÑO FINAL.

El modelo alternativo de hélice que se va a proponer busca conseguir que los álabes tengan una mayor superficie útil para que el empuje sea mayor. Todo esto manteniendo las distancias requeridas por el fabricante de diámetro de hélice y pitch.

En este segundo diseño se ha modificado el perfil de los álabes y su flexión para que siguiera teniendo ese diámetro de 200,025 milímetros.

El diseño del núcleo de la hélice ha seguido con la misma geometría que en el modelo inicial ya que no era una zona crítica, como se observó en la simulación.

Continuando con el diseño de las palas, se ha continuado realizando el croquis a un plano de 150° respecto a la vista lateral, ya que no ayudaba a conseguir el propósito establecido.

Como se puede ver en la figura siguiente, se ha hecho algunas modificaciones en el perfil especialmente en lo referente a la altura del álabe y el ángulo del extremo de la pala. Esto es necesario para después realizar unas flexiones que permitan un área de exposición mayor. Además, se ha buscado que la pieza tuviera un peso menor, por lo que la extrusión de los álabes ha pasado de 5 a 4,5 milímetros.

III. Desarrollo proyecto

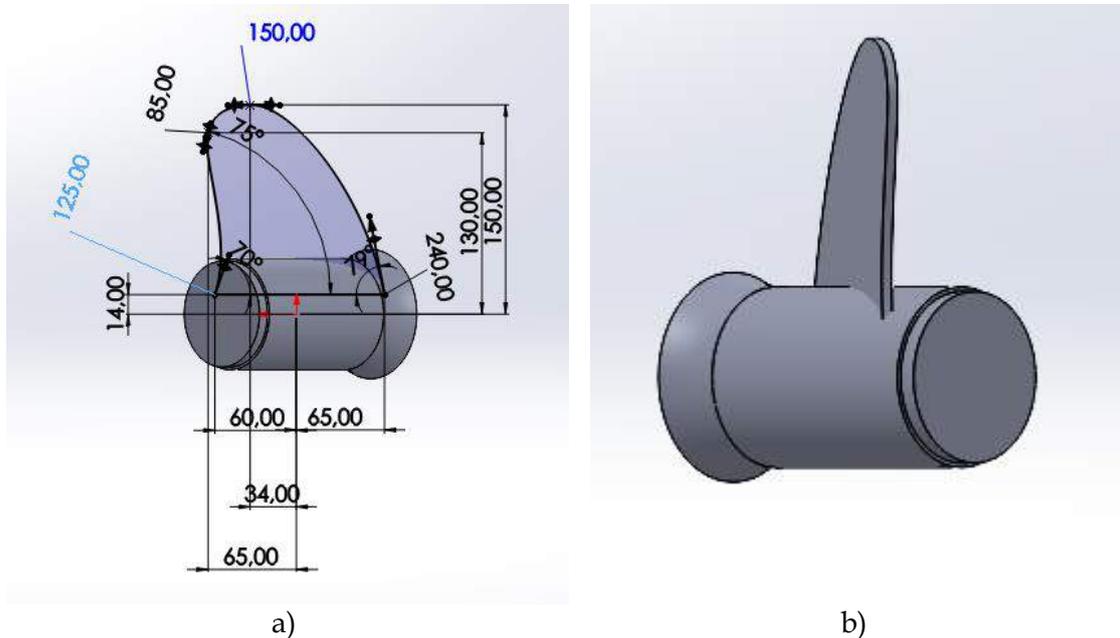


Figura III.22. a) Geometría definida del perfil del álabe de la HÉLICE v2, b) resultado de la pala de la hélice tras realizar la extrusión de 4,5 mm.

Seguidamente, se hizo dos operaciones de flexión. En la primera se pretendía que el área frontal del álabe fuese más grande para que el empuje paralelo a la línea de crujía de la embarcación tuviera un mayor protagonismo. En la segunda flexión se buscaba no perder el empuje lateral que permite que la embarcación gire a estribor o a babor, y que a la hora de que la hélice rote es indispensable que el álabe no esté en una posición ni paralela ni perpendicular al eje de giro de la hélice, sino que se desea que tenga una inclinación, como se puede comprobar en la siguiente imagen el cambio que se produce en la pala entre la primera y la segunda flexión.

III. Desarrollo proyecto

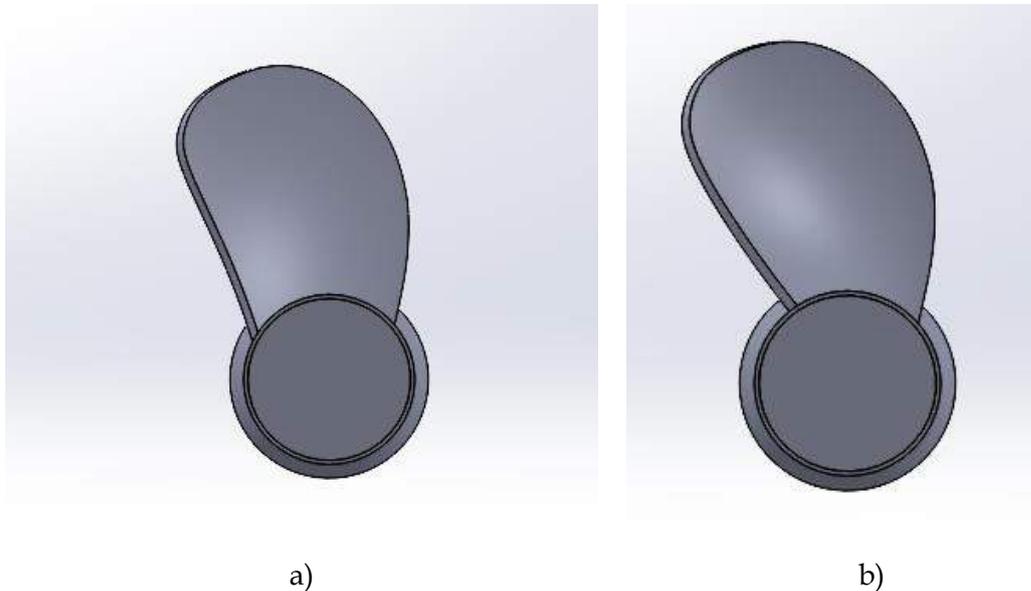


Figura III.23. a) Geometría del álabe tras la primera flexión realizada, b) resultado de la pala tras la segunda flexión, consiguiendo tener un mayor área útil para realizar las fuerzas de empuje y de giro necesarias.

Tras este paso, se realizó la matriz circular de los álabes y tener esa hélice tripala, y se vació el núcleo de la hélice para estructurar internamente el apoyo del eje. Y, además, se hicieron las operaciones de chaflán y de redondeo tal y como en el modelo inicial, exceptuando el redondeo en el borde de las palas a lo largo de su perímetro exceptuando su unión con el núcleo. El ángulo de redondeo pasó a ser de 0,5 milímetros a 1 milímetro.

Se volvió a hacer la operación de escala para que la dimensión del diámetro de la hélice coincidiera con lo estipulado, y se hizo el diseño del capicete, una vez más con splines. Por último, se hizo la comprobación del pitch con la operación hélice/espinal, dando un resultado positivo.

III. Desarrollo proyecto

ESTUDIO DINÁMICA DE FLUIDO DEL DISEÑO FINAL

Tal y como se hizo con la primera versión del modelo de la hélice, se ha utilizado un ensamblaje para poder configurar la simulación del fluido de tal manera que la hélice esté dentro de un volumen de control a unas determinadas condiciones y un volumen rotativo que permite al programa identificar el movimiento rotativo que tiene la hélice durante la simulación de fluido.

Las características y parámetros utilizados en la simulación de fluido han sido los mismos que para el modelo inicial para así tener unos resultados en las mismas condiciones de configuración de la simulación, nivel de cálculo y parámetros como la presión del volumen de control, la velocidad de rotación de la hélice o la velocidad del flujo en el eje Z, y así poder hacer una comparativa entre los resultados de las dos simulaciones.

Después del cálculo de la simulación, se crearon los gráficos que permiten visualizar las variables en el dibujo.

En la visualización del corte de región *Cut Plot* se puede observar una gran diferencia respecto a la simulación v1. La sección muestra muy poca variación de presión, además que esta es menor que la presión que se producía cuando giraba la HÉLICE v1.

Como similitud se puede decir que la zona cercana a la cara pasiva del álabe sigue presentando la menor presión de todo el volumen de control. También la zona cercana a la cara activa de la pala presenta una mayor presión, pero ésta ya no es tan exagerada respecto a la presión del resto del fluido, que se mantiene estable. Como se puede observar en la siguiente figura, la escala de presión ha rebajado sus valores en toda su gama.

III. Desarrollo proyecto

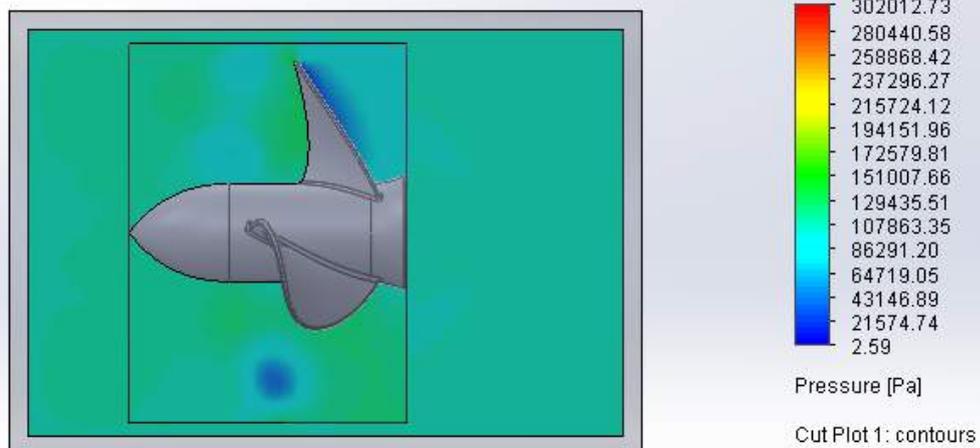


Figura III.24. Resultado de la simulación v2 mostrado como *Cut Plot*

Viendo estos resultados plasmados en la superficie de la hélice gracias a la opción *Surface Plot*, se puede observar en la Figura 23 como ahora la cara activa del álabe está sometida a una presión mucho más similar que la presión a la que está el capacete.

Además, el arco exterior del álabe se forman pequeñas zonas de altas presiones y bajas presiones. Esto se debe a que estas zonas de máxima presión son las primeras en romper la tensión del agua cuando gira la hélice gira, mientras que el extremo más azulado es donde el agua se fuga del álabe, dejando así una bajada de presión. Se puede intuir que no toda el agua que entra en el primer contacto con la pala llega con la misma velocidad al salir después de circular por el álabe, aunque esto se verá mejor en el gráfico de velocidad en el eje Z, de la figura 24.

Mientras que en la cara pasiva se observa que ya no hay una uniformidad en el reparto de presiones, sino que varía de una presión casi nula, a una presión cercana a la que soporta el núcleo de la hélice.

III. Desarrollo proyecto

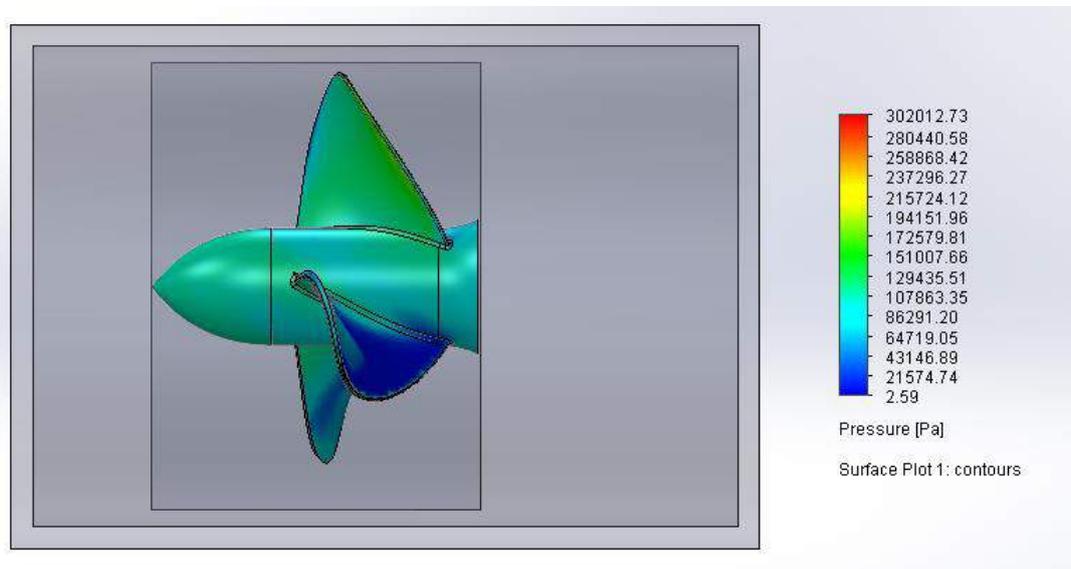


Figura III.25. Resultado de la simulación v2, mostrando los valores de presiones en la superficie de la hélice tras insertar un *Surface Plot*.

Por último, se va a analizar la velocidad del flujo en el eje Z gracias al *Flow Trajectories*. Las condiciones de visualización siguen siendo las mismas que las usadas para la simulación v1.

Como se puede observar en la figura, en este caso la velocidad se reduce cuando pasa por la zona de los álabes. Esto se debe a que ahora el fluido se encuentra con un obstáculo mayor ya que el diseño de las palas ahora hace que las caras sean más perpendiculares al eje Z.

Otro detalle que recalcar es que los pequeños vórtices que antes se creaban tras el giro del álabe, ahora apenas hay cambio de sentido en el flujo.

III. Desarrollo proyecto

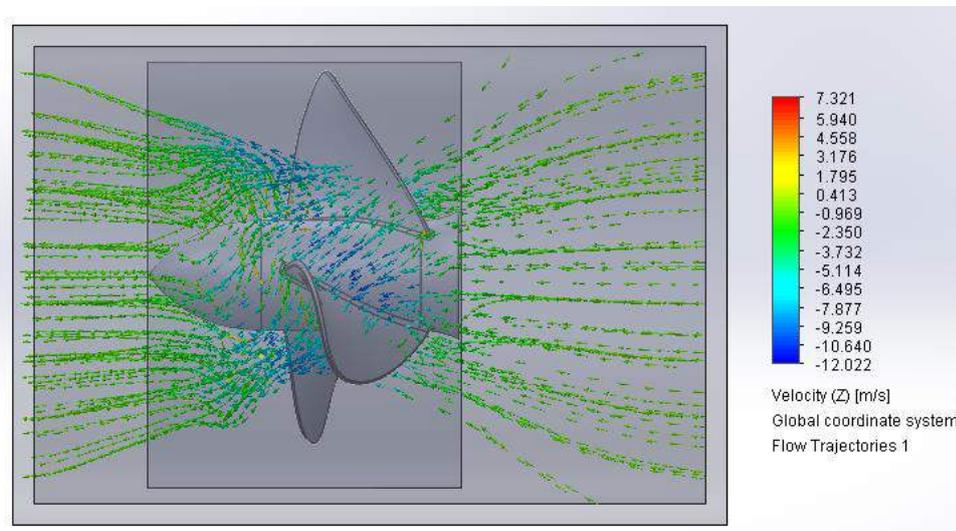


Figura III.26. Visualización de la velocidad del flujo en la dirección del eje Z y de la trayectoria del fluido en su contacto con la hélice

ANÁLISIS DE CARGAS Y SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA ALTERNATIVA DE DISEÑO

El proceso que se ha seguido para la selección del material para este rediseño ha sido distinto que el utilizado para el modelo de hélice. Esto se debe a que se ha querido adaptar este material al proceso de fabricación seleccionado en el apartado III.8.

Por este motivo, se va a analizar las tensiones en la HÉLICE v2 con el material utilizado en el modelo inicial. Una vez hecho esto, se podrá ver en los resultados el límite elástico necesario que debe cumplir el material que se seleccione, y este será uno de los valores con los que se filtre en la base de datos de Granta Edupack.

La configuración del análisis estático de cargas será el mismo que el empleado para la HÉLICE v1, pero cambiando la presión repartida que en este caso es de unos 215724,12 Pascales.

III. Desarrollo proyecto

Como se puede ver en la siguiente imagen, el límite elástico necesario es de 271,9 Mpa, mientras que si se recuerda el modelo anterior era necesario un límite elástico de unos 390 MPa.

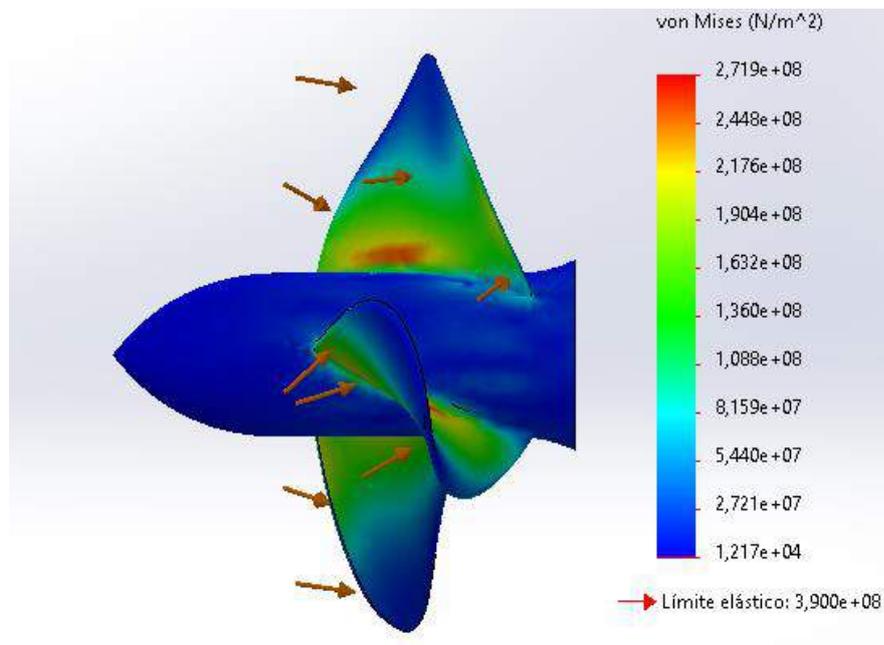


Figura III.27. Límite elástico que esta hélice solicita después del estudio estático.

Ya en Granta Edupack, se ha filtrado en la base de datos para que devuelva unos resultados en los que se incluya un aluminio, con un precio máximo de 2 €/kg, con una aceptable durabilidad con agua salada, un excelente o aceptable comportamiento para la fundición y un límite elástico mínimo de 272 MPa.

Los cuatro resultados obtenidos fueron los que se muestran en la figura 26, donde hay un material diseñado para la fundición con molde permanente, otra opción para moldeo por arena, y las últimas dos donde no especifica que tipo de molde es utilizado con este material.

III. Desarrollo proyecto

Si se entra en la información de ambos materiales se puede ver las diferentes propiedades que tiene cada aluminio. Estos son el aluminio D357.0 y el aluminio A332.0, ambos en su nomenclatura estadounidense.

De los dos materiales se ha optado el aluminio A332.0 por su mayor límite elástico, su menor precio y su punto de fusión más bajo, cosa a tener en cuenta para no utilizar demasiada electricidad en el proceso de fabricación y así que el gasto se vea reducido.

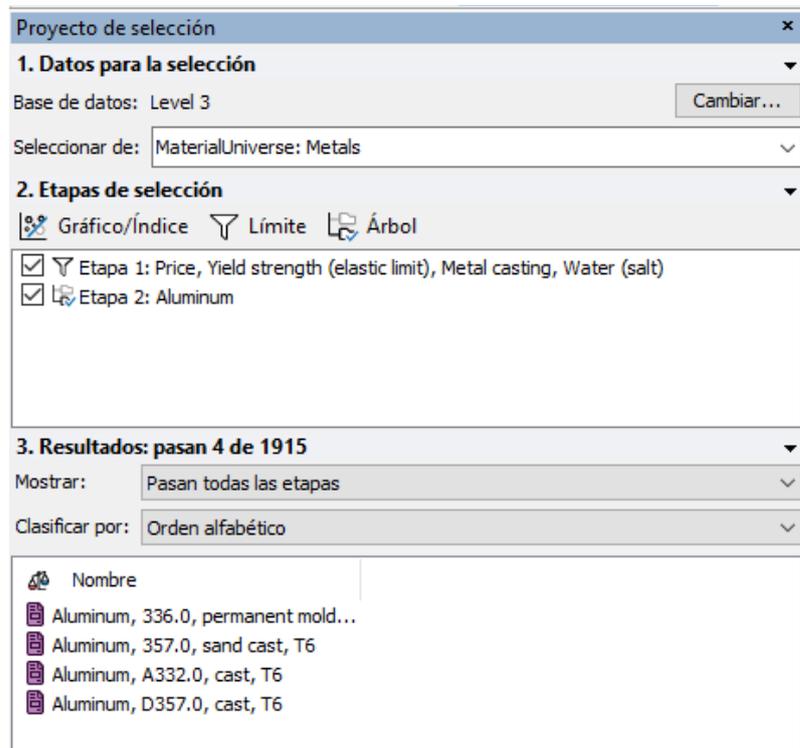


Figura III.28. Resumen de la selección de material para la HÉLICE v2

Una vez seleccionado el material, se ha aplicado a la HÉLICE v2 y nuevamente se ha hecho el análisis estático de la pieza.

III. Desarrollo proyecto

En este caso, se comprueba que el material seleccionado no supera el límite elástico que la pieza solicita. Además, se van a mostrar las imágenes de los tres tipos de resultados obtenidos tras el análisis estático

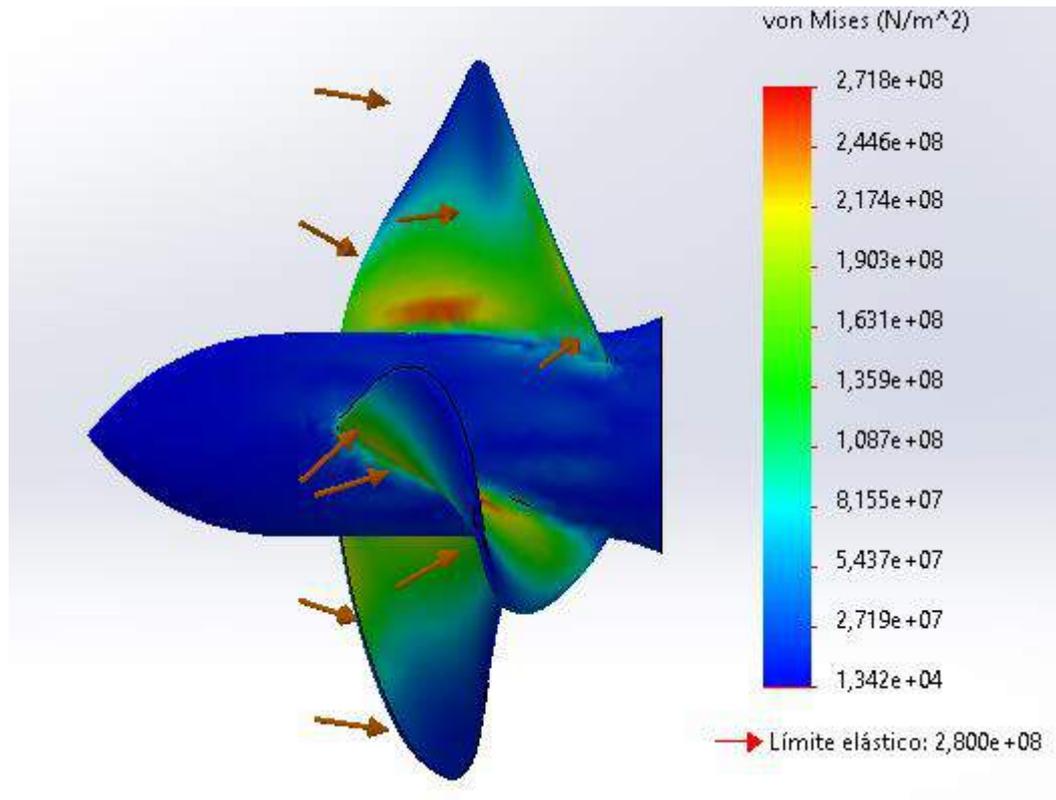


Figura III.29. Resultado de las tensiones según VonMises de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0

En la figura 17 se puede ver como en esta pieza hay mayor zona de tensiones críticas. Esta zona ya no sigue estando tan cerca de la unión del álabe junto al núcleo de la hélice, sino que está situado en una zona más central. Esta zona crítica coincide con la concavidad que presenta el álabe en esta alternativa de diseño, que se consiguió gracias a las dos operaciones de flexión realizadas.

Para evitar este cúmulo de tensiones en una zona se debería flexionar menos los álabes, aunque se perdiera eficacia a la hora de la repartición de presiones en la pala.

III. Desarrollo proyecto

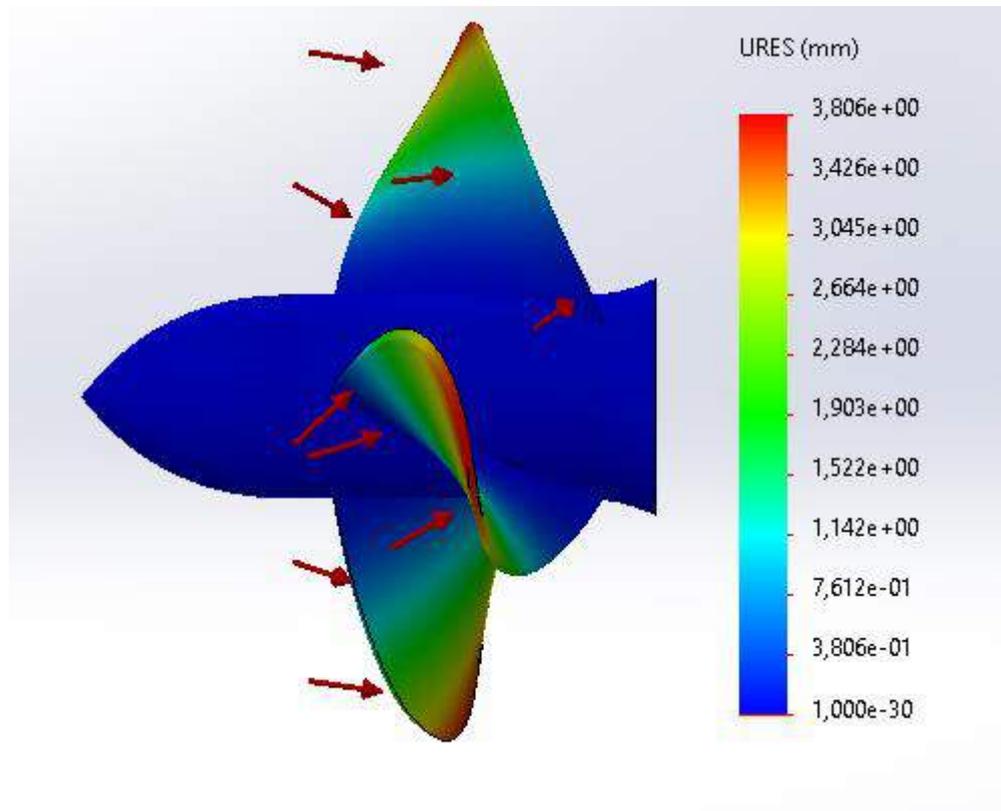


Figura III.30. Resultado de los desplazamientos de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0

En este caso como en el del modelo inicial, la zona de mayor desplazamiento sigue siendo la más alejada al centro de revolución de la hélice. Estos desplazamientos también se han conseguido disminuir gracias al diseño actual pero ínfimamente. El momento que se crea en los extremos de las palas cuando la hélice gira es inevitable, pero se podría reducir con la elección de un material más rígido, logrando tener una pieza más firme.

III. Desarrollo proyecto

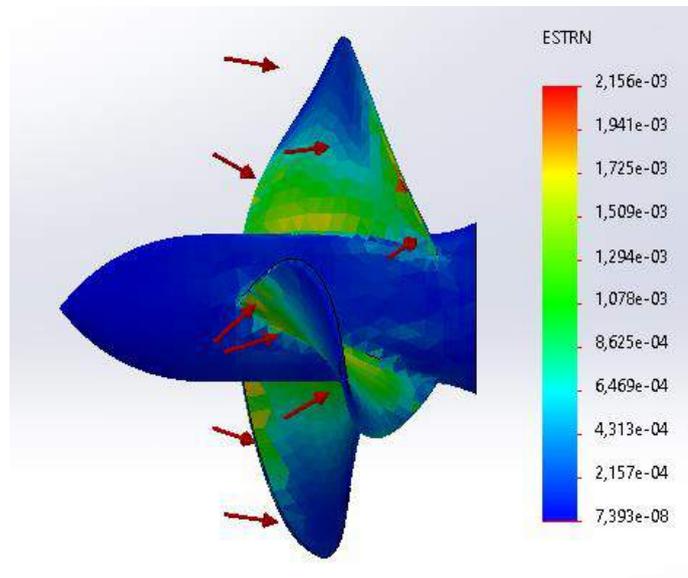


Figura III.31. Resultado de las deformaciones unitarias de la HÉLICE v2 con Aluminio A332.0

En lo referente a las deformaciones unitarias, en este diseño se puede observar como las deformaciones unitarias se reparte más y son mayores que las que experimentaba la HÉLICE v1. Al igual que pasa en la visualización de las tensiones, aquí también aparece la zona más crítica cerca de la concavidad que presenta la pala. A pesar de esto, las deformaciones son muy pequeñas por lo que este diseño tampoco sufre deformaciones que puedan preocupar.

Para más información, revisar los cálculos y simulaciones en la SIMULACIÓN DE FLUJO v2 (ANEXO 6).

III. Desarrollo proyecto

III.8. FABRICACIÓN.

Dada la complejidad geométrica tanto interna como externa de la pieza se debe analizar cuál de las múltiples opciones de los procesos de fabricación se adecúa a la fabricación de una hélice marina.

Procesos de fabricación tales como el mecanizado no se van a incluir ya que se desperdiciaría mucho material y tiempo intentando conseguir la geometría de una hélice. Se debería cambiar varias veces el ángulo de la herramienta del torno y aunque se hiciera uso de un control numérico, la estructura interna sigue siendo un reto difícil de lograr y más si se piensa en una producción a escala de esta pieza. En el caso de la inyección, se debería hacer una producción por partes como por ejemplo el núcleo y los álabes por separado, ya que realizar un diseño de un molde con esta geometría para inyección sería costoso de obtener. Si se hiciera una inyección por partes, el problema sería hacer un procesado más como la soldabilidad, y esto ya crearía posibles zonas críticas desde el punto de vista tensional.

Es por ello por lo que se ha elegido la fundición como opción más sensata desde el punto de vista de la realización del modelo y de conseguir la pieza con un buen acabado, y con vistas de una producción en masa.

FUNDICIÓN

Dentro de esta categoría se puede discernir tres clases de tipo de fundición según si el molde y el modelo son desechables o permanentes.

Si el modelo y molde son desechables existe la fundición por revestimiento o la fundición a la espuma perdida. Si se trata de un proceso con molde desechable y modelo permanente, está la fundición en arena, la fundición en molde de cáscara o en molde cerámico. Por último, se encuentran los procesos de fundición con molde permanente como la fundición por compresión.

III. Desarrollo proyecto

Se va a optar por un modelo de fundición que sea de molde desechable ya que no es necesario mucho tiempo para la fabricación de los moldes, ofrecen un buen acabado y no necesitan de corazones o piezas extra que compliquen el moldeo.

FUNDICIÓN EN MOLDE DESECHABLE

FUNDICIÓN EN ARENA

El proceso que se sigue en esta fundición es, en primer lugar, coger el modelo de la pieza y meterlo en la arena de manera que al sacarlo quede la forma en esta. Antes de quitar el modelo, se conecta el sistema de alimentación y se llena el espacio que ha dejado el modelo con el metal fundido. Se deja que el material baje de temperatura y así coja consistencia. Y, por último, se rompe el molde de arena para extraer la pieza fundida.

El tipo de arena utilizada es uno de los factores que intervienen en este tipo de proceso. Ésta suele tratarse de Dióxido de Sílice. Se puede diferenciar entre dos tipos de arena, la aglutinada naturalmente o la sintética, donde en esta última se puede variar la composición de la arena según se desee.

Una buena elección de la arena es vital ya que interviene en la permeabilidad del molde, cosa que hace que según la arena empleada el molde sea más o menos porosa y así dejar escapar los gases propios de la fundición. Este conjunto de arena además de dar una buena consistencia a las paredes del molde debe permitir que la fundición se comprima cuando se enfría y así no haya roturas cuando esté caliente.

El material del que están fabricados los modelos que dan forma al molde de arena suele tratarse de madera, plástico o metal. Su elección viene influenciada por el nivel de precisión que se le quiere dar a la pieza, cuántos usos se le quiere dar a dicho modelo, y el tamaño y la forma de la fundición. Para que no sufra desgaste se le añade un agente separador antes de realizar el proceso de fundición para así poder separar el modelo más fácil de la arena. Estos modelos pueden ser de una pieza o tratarse de varias como se ve en la siguiente figura.

III. Desarrollo proyecto

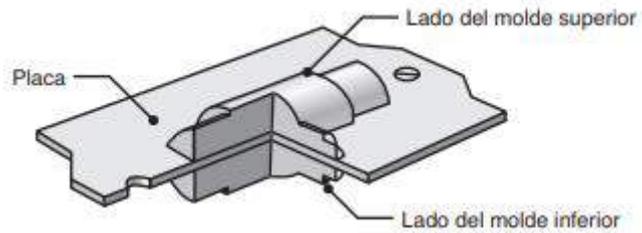


Figura III.32. Placa metálica dividida en dos partes que forman el modelo para la fundición de arena.

FUNDICIÓN EN CÁSCARA

En este proceso el modelo es metálico, se calienta y se le añade un agente separador para después situarlo en una caja que contiene una mezcla de arena y resina. Se le da la vuelta a la caja y esta mezcla granulada cae sobre el modelo caliente hasta soterrarlo. Para dar consistencia a la arena, la caja se mete en un horno y tras endurecerse, se retira las dos mitades de las cáscaras para formar el molde.

Una característica importante de este proceso es la alta calidad de los acabados por lo que un procesado posterior no suele ser necesario. Además, para geometrías complicadas no es necesario que trabajen muchos operarios en la pieza, y por tanto, es una buena opción para automatizar el proceso. El inconveniente que tiene es la producción de gases por la degradación del aglutinante de la arena, por lo que en este caso hay que prestar atención a la ventilación durante la fabricación.

FUNDICIÓN EN MOLDE DE YESO

Este tipo de fundición es una de las tres que entran en el grupo de fundición de precisión por su acabado superficial. El nombre de esta fundición se debe a que el molde en vez de utilizar arena se construye a partir de yeso y otras sustancias como talco. A esta mezcla se le añade agua y se pone sobre el modelo. Cuando el yeso está duro se quita y se pone a secar para que se deshaga de la humedad. Las dos partes del molde se juntan y se calientan unidas antes de colar la fundición dentro de éste.

III. Desarrollo proyecto

El proceso de enfriamiento de esta fundición es lento, pero esto permite que el acabado de la pieza sea más uniforme y, por tanto, se considere un buen acabado superficial. Un inconveniente que presenta es la baja permeabilidad de la fundición cosa que hace que al enfriarse la fundición los gases no puedan salir.

FUNDICIÓN EN MOLDE CERÁMICO

Este proceso es parecido al anterior con la diferencia que se usa materiales cerámicos para el molde. En este caso, después de dejar que coja consistencia los moldes se separan del modelo para secarlos y meterlos al horno, manteniéndolos unidos y así poder obtener un molde cerámico.

Al utilizar cerámica, este tipo de fundición es muy apto para colar metales con altos punto de fusión, ya que la cerámica tiene una buena resistencia a las temperaturas altas. Se trata de un proceso caro pero que ofrece un buen acabado superficial y se puede utilizar en piezas de todo tipo, tamaños y pesos.

FUNDICIÓN A LA ESPUMA PERDIDA

Se trata de un proceso singular ya que no mantiene ni el molde ni el modelo para una posible repetición de la pieza, ya que utiliza para el modelo poliestireno, que al entrar en contacto con la fundición se evapora.

En primer lugar, se coloca las bolas del polímero en una matriz ya calentada previamente, cosa que hace el plástico empiece a derretirse y adopte la forma de la matriz. Se calienta con un soplete para que quede una capa uniforme de poliestireno derretido y se deja enfriar. Tras este paso se separa el plástico de la matriz para continuar con el proceso. Esta pieza terminada de poliestireno se trata del modelo de la pieza, a la que se le añadirá una mezcla de agua y arena, se dejará secar y se meterá en una caja de moldeo. A esta caja se le agrega más arena para que sostenga el modelo y se deja

III. Desarrollo proyecto

nuevamente que se compacte todo antes de echar el metal fundido, cosa que hace que el plástico se evapore al instante. El lugar que ocupaba el poliestireno ahora se lo ha apropiado la fundición.

Una de las consecuencias de utilizar este proceso de fabricación es que el metal pierde temperatura al transferir calor al polímero para que este se evapore, lo que provoca que el metal se enfríe antes, haciendo que la estructura del material se vea alterada.

Algunas ventajas que tiene realizar esta fundición es que solo necesita de unas cajas para el moldeo, que suelen ser baratas. Este proceso no necesita de mazarotas o debe tener en cuenta la unión de dos partes del molde para hacer el vaciado de la fundición, por lo que al ser tan sencillo permite realizar diferentes diseños. Además, el polímero usado no es caro y se adapta a cualquier geometría que ofrezca la matriz.

FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO

El modelo de este proceso se realiza por inyección de cera o plástico, o por métodos que hagan obtener este elemento rápidamente como el moldeo de prototipos. Este modelo se mete en una mezcla de arena, agua y aglutinante varias veces para que se vaya creando una capa espesa y resistente. A este método se llama revestimiento porque una vez que ya al modelo de cera se le reviste de esta mezcla, además, se le añade yeso. Después se deja secar y se le aplica calor, cosa que hace que la cera se derrita y que quede tras ella la estructura de yeso, arena, aglutinante y agua con la forma que tenía el modelo de cera. Tras este paso se vacía el metal fundido y una vez está ya solidificado, se retira la capa de yeso para poder recuperar la pieza metálica.

Ya que el yeso se adapta a la forma de la cera, la geometría que se logra puede llegar a ser muy compleja.

Una de las cosas positivas que ofrece este proceso es que la cera se puede recuperar una vez finalizada una fundición para volver a hacer uso de ella. También se

III. Desarrollo proyecto

puede ensamblar en el mismo árbol diferentes modelos para así poder producir varias piezas a la vez y aumentar la producción. Asimismo, dado el buen acabado superficial que ofrece no es necesario realizar un procesado de acabado, cosa que abarata el proceso final.

La gran desventaja que acarrea esta fundición es alto precio que se debe pagar en materiales para el molde y en los operarios que trabajen en este procesado.

ELECCIÓN PROCESO DE FABRICACIÓN

Una vez se ha analizado los diferentes procesos de fundición con modelo desechable, se va a analizar los pros y contras de cada uno de ellos.

Fundición en arena: Se adapta a cualquier material y geometría del modelo, pero requiere un proceso de acabado superficial.

Fundición en molde en cáscara: Produce piezas de gran acabado superficial y se puede enfocar a una producción en serie, aunque el modelo y el equipo es caro.

Fundición por de la espuma perdida: Trabaja con cualquier metal fundido y es capaz de producir piezas complejas, pero los modelos son poco duraderos y pueden llegar a ser caros si se realizan pocas cantidades.

Fundición por molde de yeso: Realiza geometrías complejas y ofrece un buen acabado. Además, presenta una baja porosidad. El lado negativo es que no se puede utilizar en aceros, la producción está limitada y se necesita un tiempo prologando para producir el molde.

Fundición por molde cerámico: Realiza geometrías complejas con un buen acabado. No puede realizar grandes piezas.

III. Desarrollo proyecto

Fundición a la cera perdida (por revestimiento): Se puede fabricar en cualquier material con un buen acabado y piezas de geometría enrevesada. El modelo, molde y trabajadores son un gasto importante.

Como se ha mencionado con anterioridad, uno de los requisitos y problemas que surgen al seleccionar un método de fabricación es la geometría de la hélice. Al tratarse una forma compleja y buscar un buen acabado se va a optar por elegir uno de los tres procesos de fundición de precisión que son: fundición por molde de yeso, por molde cerámico y por revestimiento.

La fundición por molde de yeso queda descartada porque su volumen de producción queda limitado y se busca poder realizar una fabricación de esta pieza en masa. Entre la fundición en molde cerámico y la fundición por revestimiento, siendo ambos procesos caros, la fundición a la cera perdida ofrece un mejor acabado superficial. Además, permite reutilizar la cera cosa que en el molde cerámico no es posible volver a usar el material refractario del molde.

Por consiguiente, la fundición por revestimiento es el proceso de fabricación seleccionado para producir la hélice.

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.9. ESTUDIO ECONÓMICO.

En el siguiente estudio económico se va a comprobar la viabilidad de fabricar el diseño de la hélice. También se verá si es posible manufacturarlo en pequeñas series o a gran escala.

El presupuesto realizado para fabricar la hélice se ha dividido entres conceptos: coste de materiales, coste del mano de obra y coste en electricidad.

En costes de materiales, se ha tenido en cuenta el precio del material por kilo de peso, y el peso de material utilizado, medido también en kilos.

En costes de mano de obra, se ha indicado los salarios en bruto de los trabajadores según el convenio colectivo para la industria, servicios y tecnologías del sector del metal. También se ha estimado las horas de trabajo del diferente personal que trabaja en el proyecto de producir la hélice.

Por último, en costes de electricidad se ha tenido en cuenta información relacionada con el material como calor específico o punto de fusión, además de recopilar la información sobre el precio de la luz industrial

COSTE DE MATERIALES

Los precios de los materiales han sido obtenidos gracias a la información que ofrece Granta Edupack en su base de datos.

COSTE DE MANO DE OBRA

La plantilla involucrada en el proyecto de fabricar la hélice se ha decidido teniendo presente los grupos de mando dentro de una empresa. Por lo que el operario y delineante serían los cargos inferiores, el maestro de taller un escalafón por encima, y el jefe de taller y el delineante proyectista jefe como los altos mandos de este proyecto.

III. Desarrollo proyecto

El convenio ofrece el dato de los salarios en euros al mes. Para ajustarlo a un proceso de fabricación que dura unas horas, el salario ha sido convertido para que esté en euros por hora.

COSTE ENERGÉTICO

Como se ha mencionado en anterioridad, para este gasto se ha tenido en cuenta varias características térmicas del aluminio A332.0. Esta información ha sido recopilada usando el programa Granta Edupack.

Ya que el método utilizado es por las características térmicas del aluminio, se ha tenido presente las pérdidas de calor que se producen durante la fabricación de las piezas. Se ha estimado que el valor energético real empleado sea un 20% más que el teórico.

Además, el precio de la luz se ha estimado un promedio de los últimos 6 años ya que durante la época Covid-19, el precio ha sido inusualmente bajo.

A continuación, se va a incluir una tabla con todos los conceptos desgranados y asignando a cada término los valores de precios, horas, pesos, energías...y demás variables que se han tenido en cuenta para obtener el coste de fabricación de la hélice

III. Desarrollo proyecto

PRESUPUESTO	
MATERIALES	
Coste aluminio A332.0 (€/kg)	2
Coste yeso (€/kg)	1,4
Coste cera (€/kg)	1
Aluminio utilizado (kg)	5
Yeso utilizado (kg)	3
Cera utilizada (kg)	2
Coste total en Materiales (€)	16,2

MANO DE OBRA	
Salario bruto jefe de taller (€/mensuales)	1520,35
Salario bruto maestro taller (€/mensuales)	1324,92
Salario bruto operario (€/mensuales)	1138,67
Salario bruto delineante proyectista jefe (€/mensuales)	1423
Salario bruto delineante (€/mensuales)	1211,46
Salario bruto jefe de taller (€/hora)	9,50
Salario bruto maestro taller (€/hora)	8,28
Salario bruto operario (€/hora)	7,12
Salario bruto delineante proyectista jefe (€/hora)	8,89
Salario bruto delineante (€/hora)	7,57
Horas de trabajo jefe de taller	1,5
Horas de trabajo maestro taller	1,5
Horas de trabajo operario	4
Horas de trabajo delineante proyectista jefe	1,5
Horas de trabajo delineante	2
Coste total Mano de Obra (€)	83,63

COSTE ENERGÉTICO	
Punto de fusión del aluminio A332.0 (°C)	525
Calor específico del aluminio A332.0 (J/kg.°C)	950
Energía empleada en fundir el aluminio A332.0 (J)	4750
Energía empleada en fundir el aluminio A332.0 (kWh)	0,001319444
Energía real empleada (kWh)	0,001583333
Precio de la luz industrial (€/kWh)	0,083
Coste total en electricidad (€)	0,000131

COSTE TOTAL DE FABRICACIÓN (€)	99,83
---------------------------------------	--------------

III. Desarrollo proyecto

Ahora ya se han definido todas las variantes que intervienen en el fabricado de la hélice, y se sabe el coste total de fabricación de una de estas piezas.

Ya que sabemos el coste y el tiempo empleado por los trabajadores para realizar una sola hélice, se va a estudiar la viabilidad de hacer esta pieza en grandes series.

Se sabe que el proceso de fabricación de fundición por revestimiento es un proceso productivo muy difícil de automatizar, porque los tratamientos a realizar no siguen una secuencia lineal ni un solo tipo de proceso de fabricación. Hay que recordar que primero se realiza el modelo en cera por inyección, luego se reviste con agua, arena y aglutinante para luego pegar el yeso, se deja secar, luego se aplica calor para fundir la cera...en resumen, hay muchas acciones que tiene que hacer un operario para poder automatizar todo el proceso de fabricación.

Asimismo, se sabe que por el método manual el operario ha tardado 4 horas en procesar la pieza. Por lo que, si se intuye una jornada laboral de 8 horas y 40 horas semanales, este operario podría estar produciendo 10 hélices de aluminio A332A.0, lo que significa que al mes el taller podría producir 40 hélices con tan solo un operario.

Producir estas piezas en pequeñas series es una opción a tener en cuenta, ya que el proceso de fabricación como se ha visto es costoso y si el mercado no reclama este producto, sería haber invertido mucho dinero sin retorno. La alternativa a la automatización podría ser contratar más operarios que procesaran estas hélices ya que realizar una inversión en automatizar el proceso podría ser amortizable después de años desde su implantación

IV. APÉNDICES

APÉNDICES

IV. Apéndices

IV.1. REFERENCIAS

[1] A. Smith. "Barcos a motor". Boats.com . <https://es.boats.com/en-el-agua/barcos-a-motor/>

[2] "¿Cuántos tipos de embarcaciones a motor hay?". Mapfre.es . <https://www.mapfre.es/seguros/particulares/otros-seguros/articulos/tipos-de-embarcaciones-a-motor.jsp>

[3] M.J. Lemos. "Barcos a motor: tipos, motores y usos". Cosasdebarcos.com. <https://www.cosasdebarcos.com/blog/consejos/barcos-a-motor-tipos-motores-y-usos/>

[4] "MOTORES MARINOS PARA EMBARCACIONES". 4sailnautica.com . <https://4sailnautica.com/motores-marinos-para-embarcaciones/>

[5] "El efecto de la hélice en un barco". Marinos.es . <https://marinos.es/el-efecto-de-la-helice-en-un-barco/>

[6] "Tecnología naval". Encvirtual.es . https://encvirtual.es/PER/C1/14_15/14_15.html

[7] L. Montoya . "¿SISTEMAS DE PROPULSIÓN?". RicePropulsion.com . <http://www.ricepropulsion.com/TNLS/SistemasdePropulsion.htm>

IV. Apéndices

[8] "¿Cuáles son las partes de un barco?". Onnautic.com

. <https://onnautic.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-barco/>

[9] "Información básica de Hélices". Solas.com

. <https://www.solas.com/exec/msg.php?mid=56&cid=24&pid=56&lg=C>

[10] "TODO LO QUE NECESITAS SABER SOBRE LA HÉLICE DE TU BARCO". Nauticadvisor.com

. <https://www.nauticadvisor.com/blog/2016/03/21/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-helice-de-tu-barco/>

[11] "UNIDADES DE MEDIDA NÁUTICAS".

Sailing.enekoruibilbao.com

. <http://sailing.enekoruibilbao.com/unidades-de-medida-nauticas/>

[12] "Motor BF5A". honda-marine.es . [https://www.honda-](https://www.honda-marine.es/fuerabordas-gama-iniciacion/699-bf-5.html)

[marine.es/fuerabordas-gama-iniciacion/699-bf-5.html](https://www.honda-marine.es/fuerabordas-gama-iniciacion/699-bf-5.html)

[13] Honda Marine, " Manual de explicaciones de Honda Marine para motores BF5A, BF4.5B", Honda, España, Informe Año de publicación.

[En línea]. Disponible

en: <https://www.honda.co.jp/ownersmanual/Greens/power/>

[14] " Tolerancias Dimensionales". imh.eus

. <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/medicion-tridimensional/resultados/tolerancias/dimensionales>

[15] "Agua del mar. Temperatura media. A diferentes profundidades".

Ideascat.cat . <https://www.ideascat.cat/pub/?id=aec&n=218&lang=es>

IV. Apéndices

- [16] "Aluminio y sus aleaciones". Gasparini.com
. <https://www.gasparini.com/es/blog/aluminio-y-sus-aleaciones/>
- [17] Universidad Politécnica de Valencia. "Aleaciones para ingeniería". Upv.es
. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html
- [18] Marzo de 2021, "PRECIO NETO DE LA ELECTRICIDAD PARA USO DOMÉSTICO Y USO INDUSTRIAL" mincotur.gob.es
: https://www.mincotur.gob.es/es-es-IndicadoresyEstadisticas/BoletinEstadistico/Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/4_12.pdf
- [19] "TABLAS SALARIALES 2019 CC INDUSTRIA, LOS SERVICIOS Y LAS TECNOLOGÍAS DEL SECTOR DEL METAL PROVINCIA DE ALICANTE", Comisiones Obreras, España, Boletín oficial N° 32 de 14/02/2019. **[En línea]. Disponible en:** https://industria.ccoo.es/Pais_Valencia/Convenios/Alicante:convenios_provinciales/Industria_del_Metal
- [20] S. Kalpakjian y S.R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta Edición. Lugar de publicación: Pearson Educación, 2008.
- [21] "Tolerancias para piezas de fundición de aluminio".
Uc3m.libguides.com
. https://uc3m.libguides.com/guias_tematicas/citas_bibliograficas/IEEE#s-lg-box-wrapper-13377105

IV. Apéndices

IV. Apéndices

IV.2. NORMATIVA.

[1] *Embarcaciones y tecnología marina. Instalaciones de propulsión para embarcaciones. Parte 1: Vocabulario relativo a la geometría de las hélices*, UNE-EN ISO 3715-1. 2004

[2] *Embarcaciones y tecnología marina. Instalaciones de propulsión para embarcaciones. Parte 2: Vocabulario para instalaciones con hélice de paso controlable*, UNE-EN ISO 3715-2. 2003