



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis CFD del comportamiento hidrodinámico de una hélice
de paso controlable en flujo libre.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Juan Antonio Rodríguez-Guerra Salgueiro

DIRECTOR: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis CFD del comportamiento hidrodinámico de una hélice
de paso controlable en flujo libre.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El TFG se centra en la aplicación de las herramientas de la Dinámica de Fluidos Computacional a una hélice de propulsión de paso controlable. Para el análisis se asume que la hélice recibe un flujo de velocidad uniforme. Con ello se independizan las prestaciones de la hélice del buque y permite validar los resultados de la simulación con los ensayos de flujo libre realizados en canales hidrodinámicos. Como punto de partida se dispone de la geometría CAD del propulsor y de los resultados experimentales obtenidos en el canal hidrodinámico.

Como primer paso se realiza un reconocimiento de la geometría de la hélice. Con ayudas de programas CAD se comprueban mediciones como el diámetro de la punta y raíz del álabe, paso y longitudes de cuerda, área de bloqueo, etc. Además se realizan desarrollos cilíndricos para identificar el perfil de ala. A continuación se lleva a cabo una revisión de los diferentes canales hidrodinámicos y se explica el tipo de ensayo particular en el que fueron medidas las variables de funcionamiento de la hélice objeto de este TFG. Se obtienen los coeficientes de avance, de empuje, de par y eficiencia de propulsión a través del análisis dimensional que consigue comprimir los resultados y a la vez facilita su interpretación.

La metodología CFD comienza con la definición del dominio computacional. Acto seguido se lleva a cabo la discretización del dominio. Ya en la etapa de resolución se definen las condiciones de contorno y se seleccionan los esquemas numéricos siguiendo recomendaciones internas del programa y de fuentes bibliográficas. En la fase de post-procesado se extraen los resultados, se visualizan contornos de las variables de interés y vectores de velocidades. Los resultados globales se adimensionalizan y se llevan a una gráfica donde se comparan con los experimentales.

PALABRAS CLAVE

Hélice de paso controlable, CFD, Canal hidrodinámico, Adimensionalización, Open Water Test

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha podido ser realizado gracias a la colaboración y el apoyo de distintas personas, a las cuales me gustaría expresar brevemente un reconocimiento en este apartado.

En primer lugar un especial agradecimiento a mi director Antonio por su consejo, ayuda y constante disponibilidad.

Añadir también una dedicatoria a mis padres, María Belén y Juan Antonio, mis hermanas, Belén y Paula, y a Cristina, mi novia, por su apoyo, ánimo y paciencia, especialmente durante los últimos meses.

También mencionar al Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPA) por su ayuda en alguno de los apartados del proyecto.

Por supuesto agradecer a la Escuela Naval Militar de Oficiales y al Centro Universitario de la Defensa (CUD) la oportunidad, la formación continua en las materias necesarias y las facilidades brindadas para poder llevarlo a cabo, así como a mis compañeros de promoción por su respaldo y apoyo diario.

CONTENIDO

Contenido.....	1
Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción al CFD.....	7
1.1.1 Ventajas de las técnicas CFD.....	7
1.2 SVA Hydrodynamic Solutions (Potsdam Model Basin).....	8
1.3 Motivación.....	8
1.4 Objetivos.....	9
1.5 Estructura de la Memoria.	9
2 Modelo Físico	11
2.1 Teoría acerca de la geometría de propulsores.	11
2.1.1 Propulsores.....	11
2.1.2 Geometría hélice.	16
2.1.3 Partes y conceptos de la hélice.....	18
2.2 Hidrodinámica Básica.....	21
2.2.1 Introducción	21
2.2.2 Ángulo de Ataque, Generación de Sustentación y Resistencia.....	22
2.2.3 Teoría de la Cantidad de Movimiento (TCM)	23
2.2.4 Teoría del Elemento Pala	25
2.2.5 Teoría de la Circulación	25
3 Método Experimental.....	27
3.1 Propulsor aislado (open waters) o con Influencia Del Casco (Behind-hull) ..	27
3.2 Tipos de bancos de ensayos para la caracterización de propulsores	27
3.2.1 Canal de aguas tranquilas (Towing Tank).....	27
3.2.2 Tunel de Cavitación (Cavitation Tunnel)	28
3.3 Desarrollo experimental En Canal de Aguas Tranquilas.....	30
3.4 Adimensionalización de las variables de funcionamiento.....	32
4 Metodología Numérica	35
4.1 CAD.....	35
4.1.1 Operaciones Comprobación de la Geometría.....	36
4.1.1 Dominios	41
4.2 MALLADO	43

4.2.1 Importación y Preparación de los Volúmenes.....	43
4.2.2 Nombre superficies y dominios. Condiciones de Contorno.....	46
4.2.3 Mallado y Control de Calidad de la malla.....	49
4.3 SOLVER.....	52
4.3.1 Configuración.....	52
4.3.2 Simulación.....	57
4.4 POST-PROCESADO	59
5 Resultados	65
6 Conclusiones y líneas futuras.....	68
6.1 Conclusiones.....	68
6.1.1 Acerca del uso de las herramientas CAD para la caracterización de la Geometría.....	68
6.1.2 Acerca de la metodología CFD en la simulación de hélices	68
6.1.3 Acerca de la concordancia de los resultados numéricos con los experimentales	69
6.1.4 Acerca de la experimentación en canales hidrodinámicos.....	69
6.1.5 Acerca de la Dirección del Trabajo de Fin de Grado con un Tutor embarcado en el Juan Sebastián De Elcano.....	70
6.2 Líneas futuras	70
7 Bibliografía	71
Anexo I: Informe Ensayo experimental SVA REPORT 3752.....	73
Anexo II: Procedimiento estandarizado 7.5-02-03-02.1	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Fixed Propeller. Izquierda, hélice en bloque. Derecha, Hélice Por partes [5]	12
Figura 2-2 Variable Pitch Propeller. Hélices de paso variable. [6] [7]	12
Figura 2-3 Modelo Hélice VP1304 [8]	13
Figura 2-4 Ducted Propeller. Hélice de tobera. [5]	13
Figura 2-5 Hélice de sentido Contra-rotatorio [5]	14
Figura 2-6. Pod [9]	15
Figura 2-7 Hidrojet, Avante/Atrás. [5]	16
Figura 2-8 Vista Hélice y línea Directriz [9]	17
Figura 2-9 Nomenclatura para designar las diferentes zonas de la hélice.	18
Figura 2-10 Esquema paso hélice. [10]	20
Figura 2-11 Ángulo de Ataque. [12]	22
Figura 2-12 Caída de Presión en la Cara de Presión del Álabes. [12]	23
Figura 2-13 Esquema de velocidades de la hélice según TCM [9]	24
Figura 2-14 Gráfica de empuje y rendimiento frente a velocidades. [9]	25
Figura 3-1 Towing Tank [16]	28
Figura 3-2 Túnel de cavitación [8]	28
Figura 3-3 Hélice en tubo de cavitación. [4]	29
Figura 3-4 Explicación Ensayo Experimental. Open Water.	30
Figura 3-5 Hélice VP1304 montada en el Carro del Test. [8]	31
Figura 3-6 Hélice VP1304 sin palas. [8]	32
Figura 3-7 Curva Característica de la Hélice VP1304 en open waters [8].	34
Figura 4-1 Esquema del paso de ensayo experimental a simulación.	35
Figura 4-2 CAD Hélice VP1304.	36
Figura 4-3 Diámetro hélice y diámetro de punta de las palas	37
Figura 4-4 Diámetro raíz de las palas	38
Figura 4-5 Desarrollo $r/R = 0.75$	38
Figura 4-6 Secciones pala de la Hélice 1.	39
Figura 4-7 Secciones pala de la Hélice 2.	39
Figura 4-8 Cálculo Paso Hélice $r/R = 0.7$	40
Figura 4-9 Medición cuerda $r/R = 0.7$	41
Figura 4-10 Dominio Zona Rotativa.	42
Figura 4-11 Dominio Zona Estacionaria.	42

Figura 4-12 Volúmenes importados en GMESH.	43
Figura 4-13 Unión de Caras Duplicadas. GMESH.	44
Figura 4-14 Antes de Unir Superficies. GMESH.. . . .	45
Figura 4-15 Después de Unir Superficies. GMESH.	45
Figura 4-16 Tip de la Pala antes de simplificar. GMESH.. . . .	45
Figura 4-17 Tip de la Pala después de simplificar. GMESH.	46
Figura 4-18 Nombre Volúmenes. GMESH.....	46
Figura 4-19 Establecer Dominios. GMESH.....	47
Figura 4-20 Condiciones de contorno, WALL. GMESH.	47
Figura 4-21 Condiciones de contorno, INTERIOR. GMESH.	48
Figura 4-22 Condiciones de contorno, VELOCITY-INLET. GMESH.	48
Figura 4-23 Condiciones de contorno, PRESSURE-OUTLET. GMESH.. . . .	49
Figura 4-24 Imagen Superficies, Condiciones de contorno. GSOLVE.	49
Figura 4-25 Mallado Superficie de la Hélice. GMESH.	50
Figura 4-26 Malla dominio Rotativo. GMESH.. . . .	50
Figura 4-27 Malla Dominio Estacionario. GMESH.	51
Figura 4-28 Análisis de Malla, dominio rotativo. GMESH.	52
Figura 4-29 Ajuste Escala Malla. GSOLVE.	53
Figura 4-30 Reordenamiento del Dominio. GSOLVE.. . . .	54
Figura 4-31 Selección Modelo Turbulento k- ϵ . GSOLVE.. . . .	54
Figura 4-32 Selección de Materiales. GSOLVE.	55
Figura 4-33 Configuración Dominio Rotativo. GSOLVE.	55
Figura 4-34 Configuración Dominio Estacionario. GSOLVE.	56
Figura 4-35 Configuración de la Inlet. GSOLVE.	57
Figura 4-36 Simulación (3m/s). GSOLVE.. . . .	57
Figura 4-37 Cálculo de una Fuerza. GSOLVE.. . . .	58
Figura 4-38 Vectores, Velocidad relativa 1	60
Figura 4-39 Vectores, Velocidad Relativa 2.....	61
Figura 4-40 Vectores, Velocidad absoluta 1.....	62
Figura 4-41 Vectores, Velocidad Absoluta 2.....	62
Figura 4-42 Presión 1.....	63
Figura 4-43 Presión 2.....	63
Figura 4-44 Presión 3.....	64
Figura 5-1 Gráfica Resultados Simulación frente a experimentales.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de la Hélice VP1304 [8].	21
Tabla 2 Datos de la Hélice VP1304 [8].	37
Tabla 3 Análisis Número elementos Mallado.....	51
Tabla 4 Resultados Simulación. Empuje y Par.	59
Tabla 5 Resultados Ensayo experimental. Empuje y Par.	59
Tabla 6 Resultados adimensionales ensayo.	65
Tabla 7 Resultados adimensionales simulación.....	66
Tabla 8 Comparación resultados experimentales y simulación.	67

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este primer punto de la memoria se realiza un primer acercamiento al alcance del TFG donde se explica la motivación del trabajo y los objetivos propuestos a alcanzar. Se hace una breve introducción al CFD resaltando su importancia creciente en las técnicas de ingeniería actuales. También se habla de la iniciativa de SVA Hydrodynamic Solutions publicando resultados de ensayos hidrodinámicos para que otras empresas aproximen sus algoritmos CFD aplicados al cálculo de propulsores navales.

1.1 Introducción al CFD

CFD “*Computational Fluid Dynamics*” o “*Dinámica de Fluidos Computacional*” hace referencia a la rama de la Mecánica de Fluidos que resuelve de forma numérica las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los fluidos. Resuelve empleando ordenadores y técnicas numéricas los problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos además de otros problemas relacionados como son la transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.

El CFD abarca un gran número de disciplinas científicas en las que cabe destacar: matemáticas, programación, las ciencias físicas y la ingeniería. Su objetivo es crear un software (programa numérico) que responda a las ecuaciones de la mecánica de fluidos y que gracias a un ordenador, el cual nos permite realizar un gran número de cálculos en poco tiempo, llegar a la solución del problema.

Hoy en día la utilización se ha extendido a todo tipo de procesos comerciales, gracias a la universalización de códigos comerciales y la difusión de grandes códigos abiertos en el ámbito de la investigación. En la actualidad el CFD tiene múltiples campos de aplicación como son: industria automovilística, aeroespacial, aeronáutica, naval, química y muchas más. Las referencias [1] y [2] son obras de introducción al CFD donde se muestran las principales aplicaciones por sectores.

En España por ejemplo, el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) ofrece un servicio de “Análisis Exprés”. Este análisis exprés consiste en un asesoramiento rápido y económico sobre proyectos de construcción naval. Partiendo de la documentación del elemento de estudio en cuestión el CEHIPAR hace un estudio CFD de carenas y propulsores, con bases de datos de 18000 ensayos de 2800 buques. El CEHIPAR garantiza una respuesta en 8 días y por un coste de 9260€ (en 2010). Podemos obtener más información en su página web [3].

Se puede apreciar, por tanto, la utilidad de los estudios CFD y su bajo coste económico comparado con lo que costaría el estudio en un canal hidrodinámico con un prototipo.

1.1.1 Ventajas de las técnicas CFD

Como podemos ver el uso de las técnicas CFD abre una nueva línea de trabajo que proporciona una serie de ventajas. Sobre todo permiten reducir tiempo y costes en las fases de diseño, además de un número casi ilimitado de información, ya que cada una de las celdas que componen el dominio de simulación es como un pequeño sensor que nos proporciona información. Además permiten a algunas empresas, que no tengan ni los

recursos ni los medios para la experimentación en algunos diseños, obtener una información muy valiosa.

Sin embargo el uso de técnicas CFD tiene un coste ya que es necesario disponer de ordenadores potentes capaces de realizar los cálculos y de las licencias en caso de empleo de software comercial. Además debe contarse con personal formado que domine el software y además sepa discriminar y dar sentido a los resultados obtenidos, en caso contrario se podrían dar por buenos resultados que no lo son.

Además la cada vez mejor compatibilidad de herramientas de diseño asistido por computador (CAE), como el cálculo de tensiones y esfuerzos en estructuras y las técnicas CFD permite un avance espectacular en la interdisciplinariedad de la Mecánica de Fluidos en el análisis dinámico de estructuras.

Con relación a lo mencionado en este último párrafo para la realización de este proyecto se utilizarán diferentes herramientas: Programa de CAD, GMESH (mallador), GSOLVE (solver y postprocesado) entre otras.

1.2 SVA Hydrodynamic Solutions (Potsdam Model Basin)

SVA Hydrodynamic Solutions es una empresa asentada con más de 60 años de experiencia que utiliza métodos de cálculos probados y estandarizados, que junto con las técnicas más modernas ofrece a sus clientes soluciones hidrodinámicas a medida.

Por tanto SVA tiene una larga tradición y experiencia en el diseño de hélices y de complejos sistemas de propulsión. Alguna de las partes importantes en los programas de diseño de propulsores ha sido desarrollada por SVA Potsdam, incluyendo software para pre-procesado, solver y post-procesado.

SVA, en 2011, investigó la hélice de paso variable VP1304 con la intención de permitir a otros grupos de investigación comprobar, mejorar y validar sus herramientas numéricas de CFD.

Para ellos SVA realizó la experiencia estándar con la hélice VP1304 que pasaría a ser denominada PPTC “*Potsdam Propeller Test Case*”. La experiencia se realizó en su canal hidrodinámico y tanto las características como los resultados de la hélice obtenidos en aguas abiertas fueron publicados en un informe de acceso libre. Por tanto esto contribuirá a una mejora en la predicción numérica en aguas abiertas de los grupos de investigación que así lo requieran. Es importante decir que SVA publicó este informe sin ánimo de lucro, con la intención de ayudar a las pequeñas empresas con menos recursos. En la página web [4] podemos encontrar más información sobre esta empresa.

1.3 Motivación

Este proyecto nace con la intención de seguir la iniciativa de SVA Hydrodynamic Solutions. Se va a partir del modelo de CAD y las características facilitadas de la hélice por la empresa y a partir de ahí se van a cumplir una serie de objetivos. La intención de todo esto es desarrollar y poner en práctica todos los conocimientos obtenidos durante el grado sobre CAD, mallado, simulación, etc. Con el fin de obtener resultados reales y que pueden ser comparados con actividades que llevan a cabo otras empresas de cálculo con herramientas de la Dinámica de Fluidos Computacional.

1.4 Objetivos

En este TFG se analiza con herramientas del CFD el comportamiento Hidrodinámico de una hélice de paso controlable alimentada con un flujo de velocidad uniforme. Este tipo de ensayo es conocido como Open Water Test en la bibliografía inglesa. Como punto de partida se dispone de la geometría CAD de la hélice y de los resultados experimentales obtenidos en el canal hidrodinámico de SVA y publicados en el informe de la experiencia.

El objetivo de este TFG es desarrollar un modelo computacional que simule el comportamiento hidrodinámico de una hélice de paso controlable trabajando en flujo libre. Los pasos a dar serán:

1. Reconocimiento de la geometría de la hélice. Con la ayuda de programas CAD se comprobarán las distintas características y dimensiones de la hélice. Como son: el diámetro de la punta y raíz del álabe, paso y longitudes de cuerda, área de bloqueo, etc. Además también se realizarán desarrollos cilíndricos para identificar el perfil del ala.
2. Revisión de los diferentes canales hidrodinámicos y explicación del tipo de ensayo particular.
3. Metodología CFD. Se comienza con la selección del dominio computacional. Acto seguido se crea una malla, se definen las condiciones de contorno y se selecciona el solver más adecuado. Una vez alcanzada la convergencia se realiza el post-procesado, los resultados se adimensionalizan y se llevan a una gráfica donde se comparan con los resultados experimentales y por último se extraen las conclusiones.

1.5 Estructura de la Memoria

En la Introducción se realiza un primer acercamiento al alcance del TFG donde se explica la motivación del trabajo y los objetivos propuestos a alcanzar. Se hace una breve introducción al CFD resaltando su importancia creciente en las técnicas de ingeniería actuales. También se habla de la iniciativa de la empresa SVA Hydrodynamic Solutions.

En el capítulo de Modelo Físico, se abordan fundamentos físicos necesarios para entender el comportamiento hidrodinámico de la hélice. Primeramente se realizará una descripción de la geometría de la hélice incorporando la nomenclatura adoptada y a continuación se explica la hidrodinámica básica de la hélice.

En el capítulo de Método Experimental, se explica cómo se realizan los ensayos experimentales en los diferentes bancos de ensayo. Se abordan algunos conceptos sobre el ensayo experimental de hélices. A continuación se explican los tipos de ensayos experimentales que existen. Y por último se detalla el ensayo experimental realizado a la hélice VP1304 en concreto.

En capítulo de la Metodología Numérica se realiza el estudio CFD de la hélice VP1304. En primer lugar se trabaja con el CAD de la hélice realizando comprobaciones sobre la geometría, definiendo el dominio computacional y preparándola para el cálculo. A continuación se realiza la malla y se establecen las condiciones de contorno de las diferentes superficies. Por último se realiza la simulación de la hélice para sus diferentes puntos de trabajo y se analizan y comprueban los resultados obtenidos en el post-procesado.

En el capítulo de Resultados se muestran los resultados obtenidos de empuje, par y rendimiento en la simulación de la hélice VP1304. Además se mostrarán comparados a los resultados obtenidos por el ensayo de la hélice en el canal hidrodinámico facilitados por el informe del ensayo experimental.

En el capítulo de Conclusiones y líneas futuras se extraen las conclusiones alcanzadas con la realización de este TFG y se perfilan posibles líneas futuras que continúen el camino iniciado con este TFG.

2 MODELO FÍSICO

En este capítulo se explican los fundamentos físicos necesarios para entender el comportamiento hidrodinámico de la hélice. Primeramente se realizará una descripción de la geometría de la hélice incorporando la nomenclatura adoptada y a continuación se explica la hidrodinámica básica de la hélice.

2.1 Teoría acerca de la geometría de propulsores

2.1.1 *Propulsores*

2.1.1.1 Introducción

Hoy en día el uso de hélices se ha extendido a toda plataforma que navegue sobre el agua o bajo ella. Las hélices se han impuesto incluso al uso de otro tipo de propulsiones como puede ser el hidrojet o propulsiones alternativas bajo el agua.

Se puede comparar intuitivamente el funcionamiento de una hélice con la acción de atornillar un tornillo en la madera. Esta analogía sólo sirve para justificar el movimiento relativo del barco en el agua pero no tiene utilidad si se quiere mejorar el diseño y la eficiencia de la hélice de propulsión. El estudio hidrodinámico sólo puede hacerse bajo las leyes que rigen la mecánica de fluidos y será tratado en el apartado de estudio hidrodinámico de la hélice.

2.1.1.2 Tipos de propulsores

Existen varios tipos de hélices en función de las necesidades económicas, operativas, funcionales, etc. que requiera la embarcación. El diseño de la hélice determina sus prestaciones y como muchas embarcaciones tienen exigencias similares suele ser habitual relacionar la geometría de la hélice con el tipo de embarcación. En este apartado se van a describir brevemente los diferentes tipos de propulsiones más utilizadas que se pueden encontrar y además se describirá más en detalle la geometría de la hélice VP1304 que se va a usar para la realización de este proyecto.

2.1.1.2.1 *Hélices de geometría fija*

Este tipo de hélices ha sido la base tradicional de la mayoría de los sistemas de propulsión. Desde el punto de vista constructivo pueden ser bien de bloque compacto o bien ensambladas por unión. (Ver Figura 2-1) Este último hoy en día ya no se utiliza.

Se trata de hélices construidas en un solo bloque. Estas hélices no permiten el movimiento de las palas con respecto al núcleo o eje, por tanto disponen de una única curva de rendimiento y estarán diseñadas para una condición específica de trabajo, es decir, para propulsar a un buque de unas determinadas características a una determinada velocidad.

Además con estas hélices, al tener las palas fijas, para poder dar atrás con el buque es necesario invertir el sentido de giro del eje. Por tanto debemos disponer de una plataforma de propulsión que nos permita realizar esto.



Figura 2-1 Fixed Propeller. Izquierda, hélice en bloque. Derecha, Hélice Por partes [5]

2.1.1.2.2 Hélices de paso controlable

La hélice VP1304 objeto este trabajo es una hélice de paso controlable. Este tipo de hélices es similar a las tratadas en el apartado anterior en cuanto a su forma. Sin embargo lo que las diferencia es que las palas de hélice pueden rotar con respecto a su eje. Esto permite un ahorro de combustible porque permite dar a las palas, en cada estado de calado, el paso que más convenga para que la máquina propulsora trabaje en las mejores condiciones de rendimiento. Por tanto es como si tuviéramos infinidad de hélices de paso fijo en una. Este tipo de hélices por tanto es utilizado en remolcadores, cargueros, ferries, etc.



Figura 2-2 Variable Pitch Propeller. Hélices de paso variable. [6] [7]

Por otra parte, el hecho de que las palas puedan rotar permite dar atrás con el buque sin necesidad de invertir el sentido de giro del árbol de propulsión y por tanto no hay necesidad de parar la máquina para realizar esta maniobra. Además aumenta la vida de la máquina puesto que reduce el número de paradas y arranques sucesivos, además de ahorrar peso ya que elimina todos los mecanismos para hacer esta reversible. Esto simplificará la planta propulsora y la caja de engranajes y ayudará a reducir costes. Sin

embargo la hélice será más compleja. El hecho de introducir un mecanismo en el núcleo de la hélice que nos permita girar las palas hace que el núcleo sea de mayor tamaño y produce una reducción de rendimiento con respecto a las de paso fijo de un 2-3 %. Además a la hora de diseñar las palas se deberá tener en cuenta que no se pueden obstruir a la hora de invertir las palas para dar atrás, como podemos apreciar en la Figura 2-2.

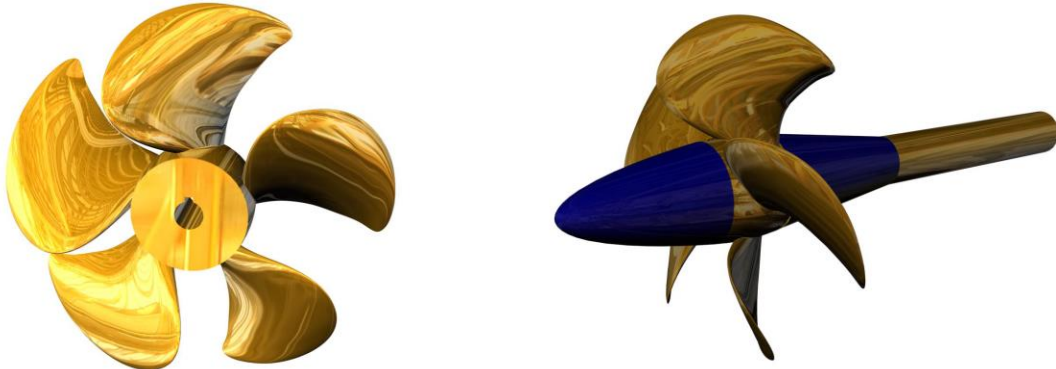


Figura 2-3 Modelo Hélice VP1304 [8]

2.1.1.2.3 Hélices con tobera

Estas hélices son similares a las descritas anteriormente, salvo que estas trabajan en un túnel o tobera que no es mucho más grande que el diámetro de la hélice, como podemos apreciar en la Figura 2-4. Esta tobera ayuda a la hélice tradicional a perder menos energía debido al rozamiento de mover las capas de líquido, exteriores y adyacentes a los bordes de las palas.

Una ventaja adicional de este tipo de hélices es que la tobera aporta una protección adicional a la hélice. Esta característica es de gran utilidad para barcos que trabajan en zonas de bajos fondos o incluso que tienen que varar, por ejemplo: buques de desembarco, gabarras, remolcadores, etc.



Figura 2-4 Ducted Propeller. Hélice de tobera. [5]

2.1.1.2.4 Doble hélice con sentidos opuestos

Esta combinación de hélices consiste en poner dos hélices en el mismo árbol, una detrás de la otra (Figura 3-5) y cada una trabajando en un sentido. En este tipo de hélices el agua sale con una componente lateral en un sentido de la primera hélice, esta componente lateral es aprovechada por la segunda hélice, la cual gira en sentido contrario, para dar más fuerza de empuje al buque. Este tipo de hélices presenta por tanto un mayor rendimiento con respecto a las hélices convencionales, aproximadamente entre un 5-7%.



Figura 2-5 Hélice de sentido Contra-rotatorio [5]

Sin embargo presenta el inconveniente de que es un sistema mucho más complejo. Para que ambas hélices giren en sentidos opuestos debemos disponer de dos árboles, uno hueco para la primera hélice y uno macizo que trabaje en el interior del primero para la segunda hélice. Este sistema es por tanto más caro, más pesado, dispone de una caja de engranajes más compleja, más difícil navegar y tiene elevados costes de mantenimiento.

Este tipo de propulsión es típicamente usado en torpedos para contrarrestar el par que produce una sola hélice con la otra.

2.1.1.2.5 Pod's

Este tipo de propulsión, como se aprecia en la Figura 2-6, está formado por una hélice de geometría fija, ubicado en el pod y que mueve la hélice, el pod, y un motor eléctrico ubicado en el casco del barco encargado de mover el pod los 360°. La hélice suele ser de geometría fija debido a la complejidad que supondría controlar una hélice de paso controlable colocada en el pod.

Este sistema se suele integrar en buques con propulsión diésel-eléctrica bastante potente, en la cual uno o varios motores diésel a través de un alternador alimentan la planta eléctrica del buque. A través de la planta eléctrica del buque se alimenta

concretamente la propulsión que en este caso son los pods. Los pods suelen trabajar en tándem (por parejas).

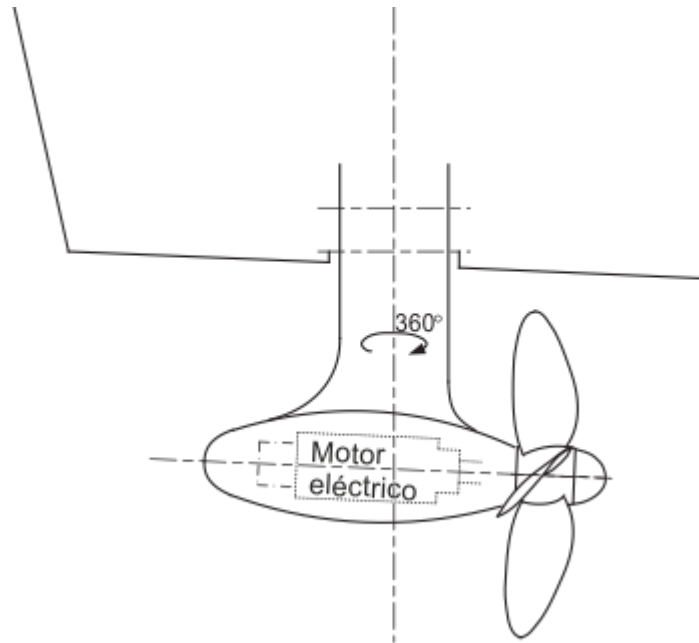


Figura 2-6. Pod [9]

Los pods tienen una serie de ventajas respecto a la propulsión convencional. La primera es que normalmente se pueden orientar los 360° dando por tanto gran maniobrabilidad y empuje direccional. Además al estar separado relativamente del casco proporciona una propulsión limpia, con un mejor rendimiento, sin vibraciones, cavitación y ruido. Además gracias a que el motor eléctrico está situado en el pod se ahorra espacio, simplifica la cámara de máquinas y no necesitamos un árbol que recorra casi la mitad del barco atravesando múltiples compartimentos.

Esta propulsión se está implementando cada vez más en los buques de la Armada Española debido a sus prestaciones en las plataformas de propulsión eléctrica y por las facilidades que proporciona su maniobrabilidad. Por ejemplo en el Juan Carlos I o en cazaminas.

2.1.1.2.6 Hidro-jet

Esta propulsión es típicamente utilizada en pequeñas lanchas deportivas, motos de agua o unidades de lanchas de rescate. Básicamente este tipo de propulsión consiste en un canal que atraviesa el casco de la embarcación (con una sección de entrada y otra de salida) en el cual una hélice empuja el agua a través de él. Se podría entender como una especie de propulsión a chorro. Además este chorro se puede direccionar para poder dar adelante o dar atrás (Figura 2-7) con un sencillo dispositivo situado en la sección de salida.

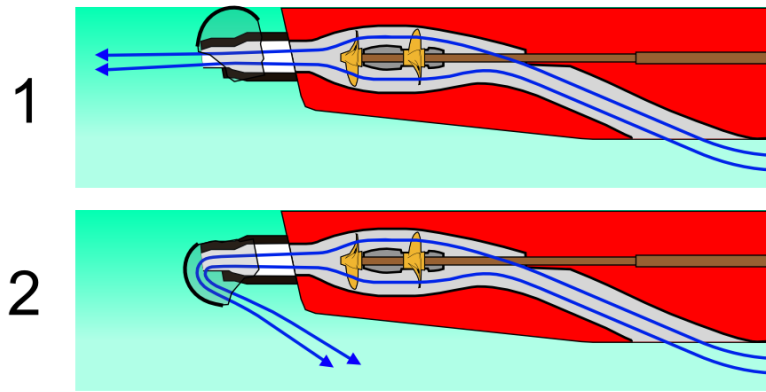


Figura 2-7 Hidrojet, Avante/Atrás. [5]

El hidro-jet es una propulsión que tiene un mejor rendimiento a velocidades altas (más de 30 nudos), sin embargo las pérdidas producidas en la entrada y la salida no lo hacen una de sus principales características. Lo que lo hace especial es que no dispone de apéndices externos al casco, es decir, el eje y la hélice no están expuestos y por lo tanto no se puede acceder externamente a ellos, por eso es utilizada para embarcaciones de recreo y salvamento ya que nos aporta la seguridad de no golpear nada con ésta. Por el contrario hace la construcción del casco una tarea algo más compleja.

2.1.2 Geometría hélice

Para poder entender correctamente el funcionamiento de una hélice es indispensable conocer a fondo su geometría. Una hélice está formada por un conjunto de palas (entre 2 y 7 palas generalmente) las cuales van unidas a un núcleo (boss). Las hélices pueden estar construidas en una sola pieza, como es el caso de las hélices de paso fijo, o por el contrario pueden estar construidas en varias piezas siendo por tanto diseños más complejos, como por ejemplo cuando las palas de la hélice son de otro material o el caso de las hélices de paso controlable. Esto último hará que las dimensiones del núcleo sean mayores y que las uniones de las diferentes palas con el núcleo no sean tan limpias y por tanto afectará a la eficiencia de la hélice.

Las palas de las hélices generalmente se definen con respecto a una línea generadora o también llamada directriz, como se puede apreciar en la Figura 2-8. Esta línea podría ser perpendicular al eje de la hélice, sin embargo suele estar ligeramente inclinada a popa o a proa, esto es lo que se entiende como lanzamiento axial de la pala. Para usos normales de la hélice se suele inclinar a popa, esto permite controlar bien los esfuerzos que sufre la pala y se pueden usar secciones de pala más delgadas, lo que puede interesar desde el punto de vista hidrodinámico. Sin embargo para usos con una elevada velocidad de avance la hélice suele tener un lanzamiento axial a proa lo cual permite controlar los momentos de flexión en la pala, momento producidos por la fuerza centrífuga y momentos producidos debido a la carga de empuje.

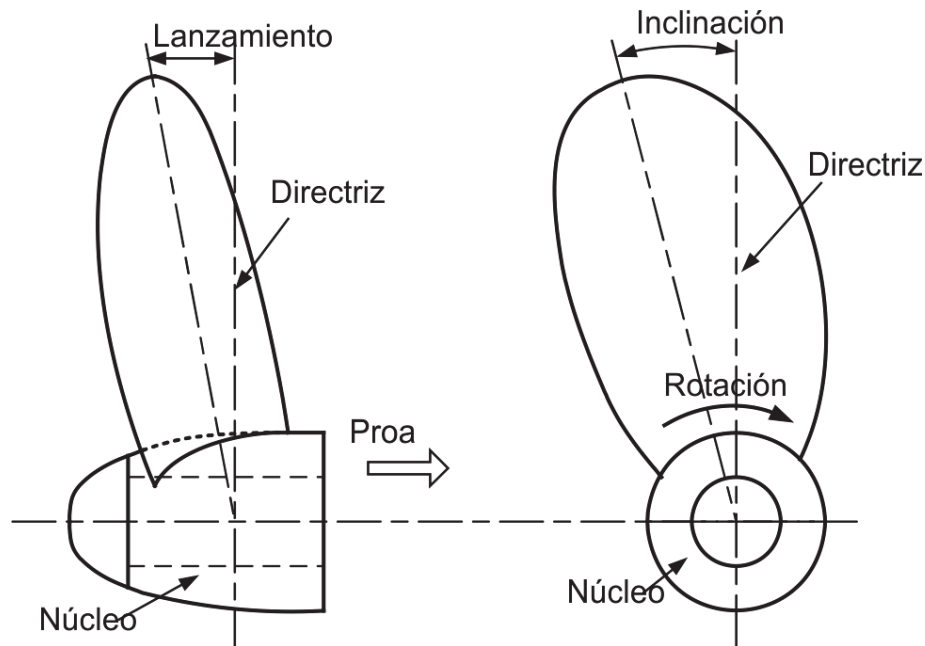


Figura 2-8 Vista Hélice y línea Directriz [9]

Además también existe un lanzamiento circunferencial o inclinación. Si se mira la hélice desde popa se puede apreciar que el desarrollo de la pala no es perfectamente simétrico, Figura 2-8, sino que tiene un cierto desarrollo asimétrico con respecto a la directriz. En el caso de las hélices de paso controlable esta línea generalmente coincide con el eje de rotación de la pala con respecto al eje. Se ha demostrado que este lanzamiento es muy efectivo en la reducción de esfuerzos vibratorios, vibraciones inducidas por la presión del casco y en retrasar el desarrollo de la cavitación. Todo esto influye al rendimiento ofrecido por la hélice, al ruido que pueda producir y a la comodidad para la navegación, por tanto será un tema importante a tratar a la hora de diseñar una hélice.

Las palas de la hélice se definen con una serie de secciones o cortes a lo largo de la pala. Las secciones se realizan con un cilindro concéntrico con el eje de la hélice. La cuerda media de cada sección forma un determinado ángulo con respecto al eje de la hélice. Esta línea forma un helicoides en la superficie del cilindro. Esto está relacionado con el paso geométrico de la hélice, se define como la distancia que avanza axialmente la hélice en una revolución. Este concepto se explicará más adelante.

Otro tema importante con respecto a la geometría de una hélice es el número de palas. El número de palas, como se mencionó anteriormente, varía entre 3 y 7 aunque hay excepciones. Los buques mercantes suelen usar generalmente 4, 5 o 6 palas a excepción de los remolcadores y pesqueros que suelen llevar 3. En otras plataformas donde el ruido producido por la hélice es un factor importante el número de palas suele ser superior a 5. Generalmente buques de guerra.

El número de palas también dependerá de aquellas frecuencias que se quieran evitar para no dañar la estructura del buque y frecuencias de torsión de la maquinaria. Además se ha demostrado que el rendimiento de la hélice y el diámetro óptimo aumentan a medida que disminuye el número de palas de la hélice.

2.1.3 Partes y conceptos de la hélice

Para poder estudiar mejor las hélices y poder referirnos con mayor precisión a ellas en esta sección de la memoria se van a tratar las partes de la hélice y algunos conceptos importantes, como describe el autor en [10]. En la Figura 2-9 podemos observar una imagen de CAD de la hélice de la que trata el proyecto, la hélice de paso controlable VP1304. Sobre ella se han marcado las partes principales de una hélice. Destacar, para evitar confusiones, que la hélice está en configuración “pull” o “tirar” para realizar el estudio hidrodinámico y el ensayo en el canal.

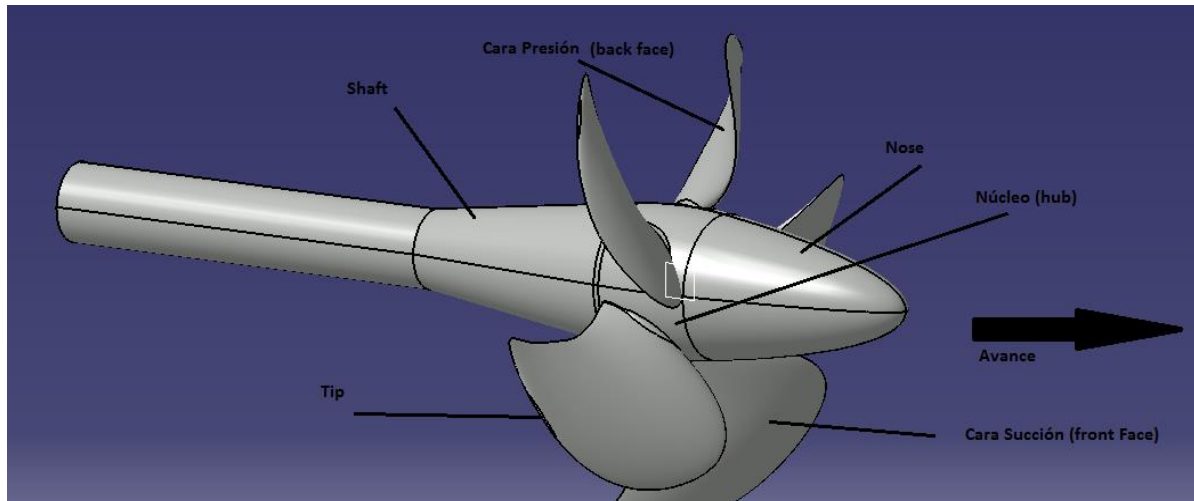


Figura 2-9 Nomenclatura para designar las diferentes zonas de la hélice.

2.1.3.1 Núcleo (Hub)

El núcleo (hub) es la parte de la hélice donde van unidas las palas. Para obtener un máximo rendimiento y empuje el núcleo debería tener el menor diámetro posible. Sin embargo un núcleo con un radio demasiado pequeño sería muy débil para soportar las fuerzas producidas por las palas y rompería. Por tanto tiene que haber un equilibrio entre tamaño y resistencia.

Además como ya se ha mencionado anteriormente existen hélices, como las de paso controlable, las cuales tienen en el interior del hub mecanismos para poder modificar la posición de las palas. Esto hace que el tamaño del hub esté condicionado.

2.1.3.2 Palas o álabes (Blades)

Son aletas o láminas unidas al núcleo con una forma determinada. La forma de las palas, su tamaño, el número de palas y la velocidad a la que gira la hélice determina el empuje que puede proporcionar la hélice.

2.1.3.3 Raíz del álabe (Blade root) y punta del álabe (Tip root)

La raíz del álabe (blade root) es la parte de la pala más próxima al núcleo. En la raíz se tiene el desarrollo cilíndrico del álabe de menor radio. Además de importancia hidrodinámica también tiene importancia estructural ya que es donde se tienen las mayores fuerzas internas.

La punta del álabe (blade tip) es la parte de la pala más externa y por tanto donde se tiene el desarrollo cilíndrico de mayor radio.

2.1.3.4 Cara de presión y cara de succión del álabe (Pressure and suction faces)

La cara de presión también (Back face o Pressure face) es la cara de la pala en la cual existe una mayor presión. Es la cara que mira a popa del buque.

La cara de succión (Front face o Suction face) es la cara de la pala de la hélice donde hay menos presión. Es la cara que mira a proa.

Estas dos partes de la pala se pueden asemejar al ala de un avión, a la vela de un barco o de un parapente donde existe una cara de presión y otra de succión.

2.1.3.5 Borde de ataque (Leading edge) y borde de desprendimiento (Trailing edge)

Cuando la hélice gira en la pala encontramos dos bordes: el borde de ataque (leading edge) que es aquel que corta el agua con el movimiento del buque y borde de desprendimiento (trailing edge) que es por donde sale el fluido que modifica la hélice.

2.1.3.6 Hélice dextrógira y levógira

Una hélice dextrógira es aquella que cuando se quiere dar adelante gira a derechas o en el sentido de las agujas del reloj y cuando quiere dar atrás gira en el sentido contrario. Y por tanto una hélice levógira cuando se quiere dar adelante gira a izquierdas o sentido contrario de las agujas del reloj.

Si se mira desde popa la hélice de un barco veremos el leading edge más alejado de nosotros mientras que el trailing edge será la parte de la pala de la hélice más próxima.

Generalmente los buques con una sola hélice llevan hélice dextrógira. Sin embargo cuando llevan 2 o más hélices suelen combinar ambos tipos para contrarrestar los efectos producidos por el giro de la hélice en un determinado sentido. Así, un buque con dos hélices llevara una dextrógira y una levógira.

La hélice VP1304 de este trabajo es dextrógira.

2.1.3.7 Paso (Pitch)

El paso de una hélice (o paso nominal) se define como la distancia axial de avance en una revolución completa. Sin embargo desde el momento que unimos la hélice al árbol de un buque no todo el paso de la hélice se convierte en avance del barco. La diferencia entre el movimiento real del buque y el paso nominal de la hélice se llama deslizamiento (slip).

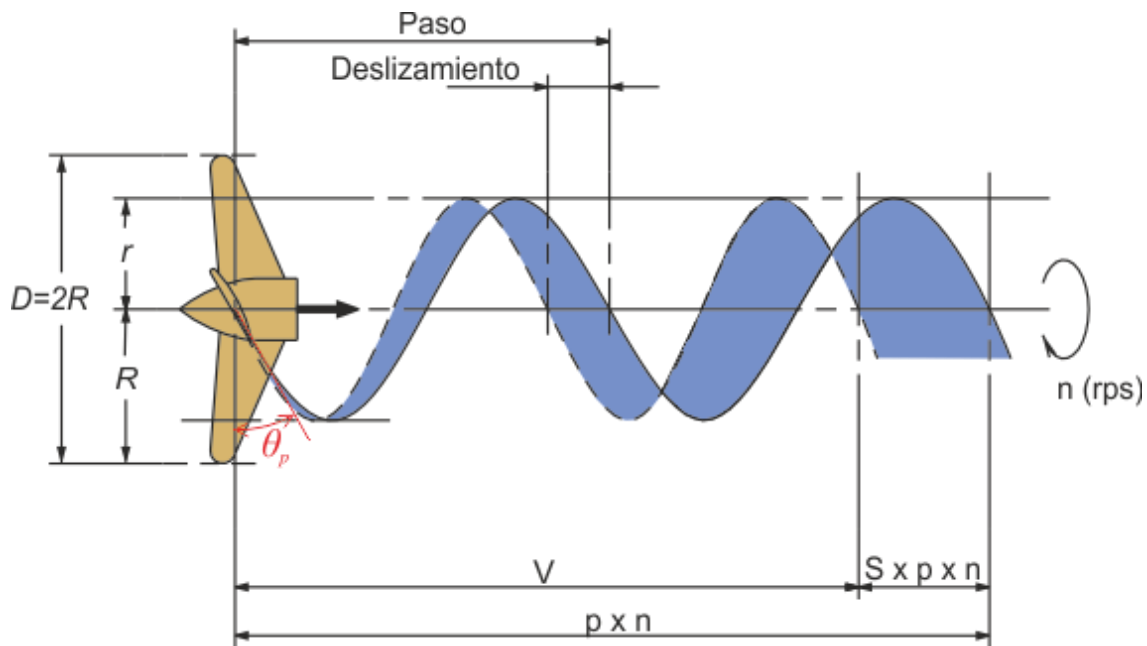


Figura 2-10 Esquema paso hélice. [10]

Como se ve en la Figura 2-10 se puede relacionar el paso de una hélice en un determinado punto de la pala (r/R) con el ángulo complementario que forma la misma con respecto al eje de la hélice. Por tanto para calcular el paso de la hélice a una cierta distancia radial r

$$\tan \theta_p = \frac{\text{Paso} \left(\frac{r}{R} \right)}{2\pi r}$$

Donde r es la distancia radial y R es el radio de la punta de hélice.

Sabiendo esto, es importante saber que una hélice de paso variable es aquella cuyo paso va variando radialmente, es decir, a medida que nos alejamos o acercamos al eje el paso de la sección de la pala varía (Paso variable). Sin embargo también existen hélices de paso controlable, las cuales son hélices cuya posición relativa de las palas con respecto al eje se puede modificar. Por tanto puede haber hélices de geometría fija que presenten paso variable en la dirección radial.

2.1.3.8 Relaciones de área y paso

Otros parámetros que dan mucha información de la geometría de la hélice y que tienen efecto sobre el comportamiento de la hélice son:

- Área del disco (A_o): Que es básicamente el área que ocupa la hélice usando su radio exterior, el punto más externo de las palas ($A_o = \pi R^2$).
- Área desarrollada (A_E ó A_D): sería la superficie que tiene la hélice, es decir, la superficie de cada pala multiplicada por el número de palas.
- Área proyectada (A_p): sería el área ocupada por la hélice proyectada en un plano perpendicular al eje de giro de la hélice.
- Relación de área desarrollada (A_D/A_o): esta relación es bastante importante a la hora de diseñar una hélice. Sus valores van desde 0.3 a 0.5. Se escoge una relación de tal manera que la carga generada en la pala de la hélice se la suficientemente baja para evitar la cavitación. Una relación pequeña va asociada con bajo coeficiente de empuje la hélice mientras que una relación alta presenta un bajo rendimiento al incrementar considerablemente las pérdidas por fricción.
- Relación de área proyectada (A_p/A_o).
- Relación de paso (P/D).

En la Tabla 1 se pueden observar los valores de las medidas de la hélice VP1304.

Diámetro	D	[mm]	250
Paso $r/R=0.7$	$P_{0.7}$	[mm]	408.7500
Paso $r/R=0.75$	$P_{0.75}$	[mm]	407.3804
Cuerda $r/R=0.7$	$C_{0.7}$	[mm]	104.1670
Cuerda $r/R=0.75$	$C_{0.75}$	[mm]	106.3476
Relación Paso $r/R=0.7$	$P_{0.7}/D$	[-]	1.635
Relación de Área	A_E/A_o	[-]	0.77896
Skew	θ_{EXT}	[°]	18.837
Relación D del Hub	d_h/D	[-]	0.300
Numero de palas	Z	[-]	5
Sentido de Rotación		[-]	A derechas.
Tipo de Hélice		[-]	Hélice de Paso Controlable.

Tabla 1 Datos de la Hélice VP1304 [8].

2.2 Hidrodinámica Básica

2.2.1 Introducción

Las teorías que existen sobre el funcionamiento de la hélice son un conjunto de hipótesis y cálculos numéricos que intentan explicar y representar analíticamente el funcionamiento hidrodinámico de una hélice. Se puede decir que existen tres teorías que se acercan a explicar el funcionamiento de las hélices, que han ido evolucionando con el

desarrollo de las herramientas matemáticas y los conocimientos sobre la mecánica de fluidos. Éstas son:

- Teoría de la cantidad de movimiento (TCM)
- Teoría del elemento de pala.
- Teoría de la circulación.

En la referencia [11] y [12] se puede encontrar más información sobre el funcionamiento básico de los propulsores en la mar.

2.2.2 *Ángulo de Ataque, Generación de Sustentación y Resistencia*

En este apartado se va a explicar cuál es el efecto que se produce cuando un fluido como el agua pasa alrededor del álabe de una hélice. Este efecto es el mismo que ocurre con el ala de un avión, la vela de un barco o la cometa de un kitesurfista.

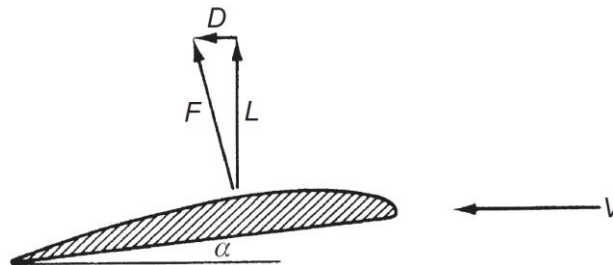


Figura 2-11 Ángulo de Ataque. [12]

En la Figura 2-11 se puede ver el ángulo de ataque. Éste es el ángulo que forma la velocidad relativa del fluido con respecto a la sección del álabe de la hélice cuando entra en la hélice. El ángulo de ataque de la pala de la hélice depende de la velocidad de avance del buque y de la velocidad de rotación de la hélice. Para un ángulo de ataque mayor que cero se genera una fuerza de sustentación normal a la superficie del álabe producida por el flujo de agua y a su vez una fuerza de rozamiento en la dirección de la velocidad relativa del agua. Si el ángulo de ataque fuera igual a cero entonces la pala no experimentaría ninguna fuerza de sustentación y la hélice no proporcionaría empuje al buque.

Debido al principio de Bernoulli habrá un incremento de presión en la cara de presión y un decremento de presión en la cara de succión. El efecto que se produce cuando el fluido pasa alrededor de la pala de la hélice es que la velocidad relativa es mayor en la cara de menor presión y menor en la cara de mayor presión.

En la cara de presión existe un punto de caída de presión entre la mitad de la pala y el borde de ataque de la pala, como se puede ver en Figura 2-12. Si esta caída de presión es demasiado alta en relación con la presión ambiente en un fluido como el agua aparecerán burbujas de vapor de agua. Estas burbujas van creciendo hasta el borde de desprendimiento y colapsan cuando entran en una zona con mayor presión. A este efecto se le conoce como cavitación y es mala para el ruido y el rendimiento de la hélice.

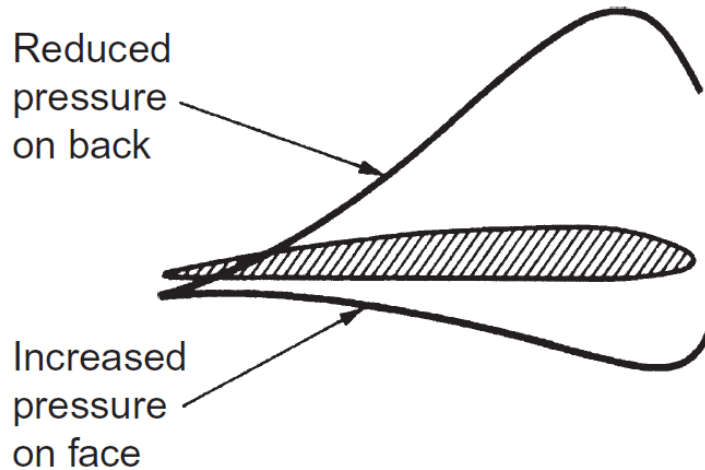


Figura 2-12 Caída de Presión en la Cara de Presión del Álab. [12]

2.2.3 Teoría de la Cantidad de Movimiento (TCM)

Esta teoría fue propuesta por Rankine y la cual a su vez comprende dos razonamientos. El primero el cual supone que el fluido sólo tiene una velocidad de dirección axial, es decir, que la velocidad del fluido es únicamente paralela al eje de la hélice. Esta teoría se llama teoría de la cantidad de movimiento Axial. El segundo, parte del primer razonamiento pero además supone que el fluido también va a tener una determinada componente angular. Y por tanto es llamada Teoría del impulso Angular. Como menciona el autor en [13].

Como dice el autor en [9] [14] se puede decir que los propulsores trabajan modificando la cantidad de movimiento del fluido en el que trabajan siguiendo las leyes de Newton. Por tanto la fuerza será igual la variación de la cantidad de movimiento del fluido y las fuerzas de acción y reacción son iguales y de sentido contrario.

Se va a establecer, como se ve representado en la Figura 2-13, una región de entrada, antes de la hélice, con una velocidad V_1 , una región de salida, después de la hélice, con una velocidad V_2 y definiremos $\dot{m}$ como el flujo masico de fluido. Por tanto:

$$T (\text{empuje}) = \dot{m} (V_2 - V_1) \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde la variación de la cantidad de movimiento del fluido puede ser producida de múltiples maneras por el propulsor, dependiendo del tipo de propulsor, del número de propulsores y de sus características.

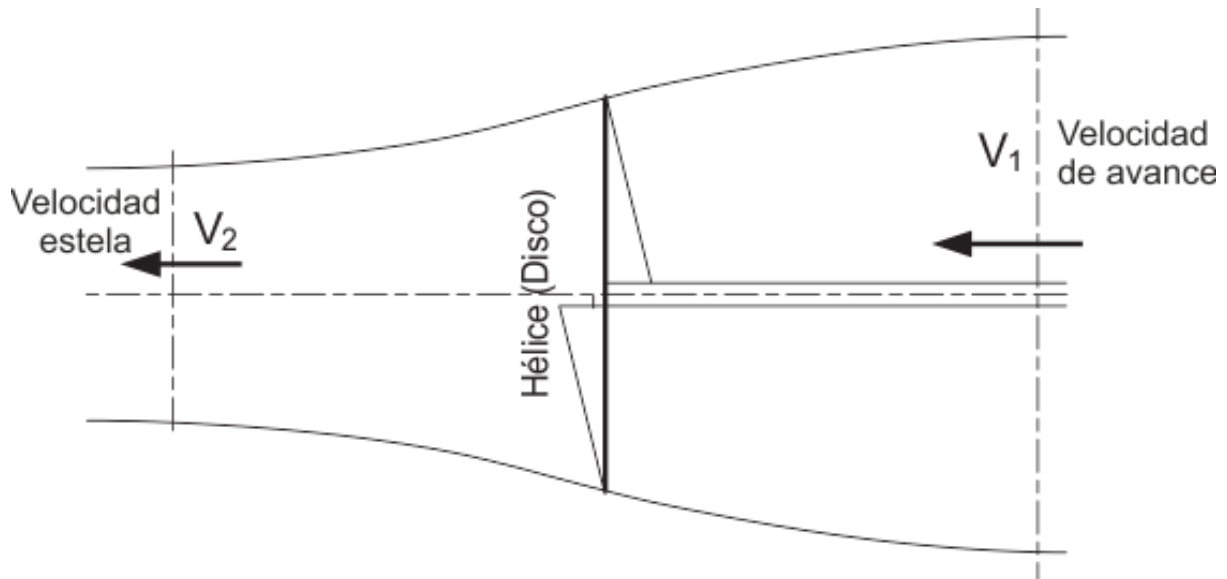


Figura 2-13 Esquema de velocidades de la hélice según TCM [9]

2.2.3.1 Eficiencia según la Teoría de la Cantidad de Movimiento

Para entender los niveles de eficiencia de la hélice vamos a comparar el empuje con la variación de la cantidad de movimiento del fluido.

Por tanto la característica fundamental de cualquier propulsor es la que se muestra en la Ec. (3.1). Y podemos deducir dos situaciones extremas:

1. Que el empuje sea nulo. Por tanto $V_2 = V_1$ y donde la eficiencia del propulsor sería nula.
2. Donde el empuje es máximo. Esta situación es con el buque sin arrancar, esto es, con $V_1 = 0$. Donde no se estaría produciendo trabajo y por tanto el rendimiento de propulsión es nulo.

En la Figura 2-14 se representa los resultados de empuje y rendimiento de propulsión obtenidos con la aplicación de la teoría de la TCM. La curva del empuje (Thrust T) alcanza su valor máximo con $V_1 = 0$ y su valor mínimo con $V_2 = V_1$. Y la del rendimiento de propulsión (η) alcanza su valor máximo en un punto entre V_1 y V_2 . Los resultados obtenidos proporcionan información sobre los límites ideales de la eficiencia que se pueden alcanzar con una hélice de propulsión pero no proporciona información relevante a mejorar el diseño de un sistema propulsor. Sirva como ejemplo que ni siquiera se considera la velocidad angular de giro de la hélice. Se hace necesario acudir a teorías que permitan un mayor acercamiento al sistema físico real.

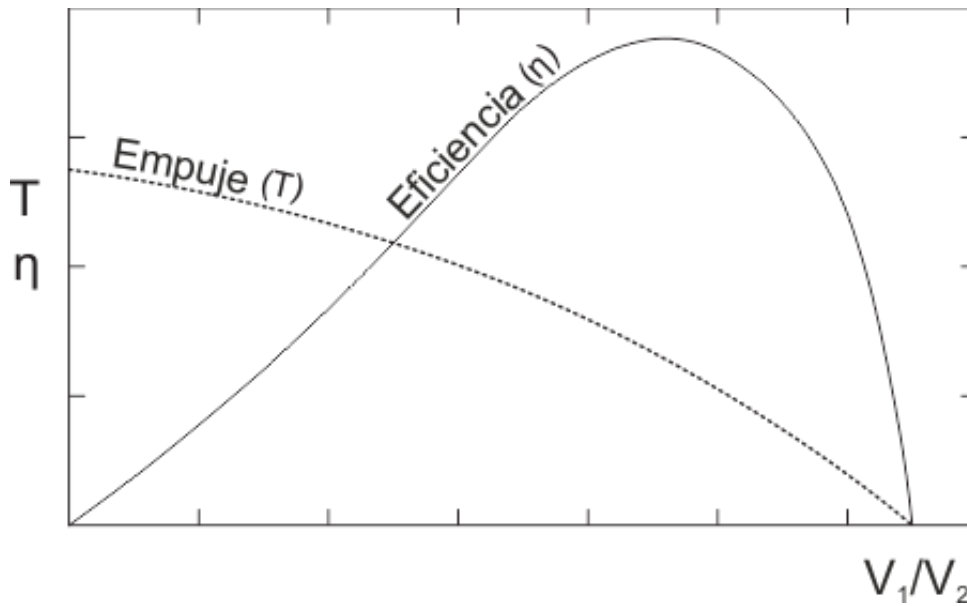


Figura 2-14 Gráfica de empuje y rendimiento frente a velocidades. [9]

2.2.4 Teoría del Elemento Pala

La teoría del elemento pala, iniciado por W.Froude, se basa en calcular las fuerzas que aparecen en la sección radial diferencial de una pala (secciones $R + dR$) y teniendo en cuenta la velocidad axial y radial de ese punto a partir de la teoría de la cantidad de movimiento. A partir del cálculo de esta sección es capaz de calcular la cara completa.

Por tanto para calcular el empuje producido por una hélice habría que hacer el cálculo anterior y a continuación multiplicarlo por el número de palas.

Para esto se considera el movimiento del fluido estacionario e incompresible y no se tienen en cuenta efectos de rotación de la estela. Los elementos de pala se tratan como perfiles hidrodinámicos que se desplazan a una velocidad, resultante de la velocidad de avance de la hélice y de la velocidad tangencial del propio elemento. [13]

Esta teoría no tiene en cuenta factores que han de tenerse en cuenta en teorías más exhaustivas. Estos son:

- El número finito de álabes y la variación axial y rotativa del flujo de entrada.
- Las interferencias entre álabes.
- El flujo cerca del “tip” de la hélice que va desde la cara de succión a la cara de presión y que produce remolinos en el fluido modificando la sustentación y resistencia de esa parte de la pala.

2.2.5 Teoría de la Circulación

Esta teoría fue desarrollada por Prandtl en 1918 y por Betz en 1919, y se basa en que la fuerza de sustentación del flujo externo sobre un perfil, se debe a la circulación que existe alrededor de su contorno. La solución exacta de las ecuaciones diferenciales las dio Goldstein en 1929, introduciendo unos factores que recibieron su nombre. En 1952 Lerbs generalizó el método aplicándolo a distribuciones de circulación arbitrarias y flujos de entrada variables. La teoría de circulación sustituye la pala por una línea (línea de sustentación), en la que la circulación varía con el radio; esto no es aplicable en las palas de cierta anchura, y se tiene que trabajar con las denominadas superficies de sustentación,

que aumenta el número de cálculos. En la referencia [15] se puede obtener más información sobre este tema.

3 MÉTODO EXPERIMENTAL

En este capítulo de la memoria se explica como se realizan los ensayos experimentales en los diferentes bancos de ensayo. Se abordan algunos conceptos sobre el ensayo experimental de hélices. A continuación se explican los tipos de ensayos experimentales que existen. Y por último se detalla el ensayo experimental realizado a la hélice VP1304 en concreto.

3.1 Propulsor aislado (open waters) o con Influencia Del Casco (Behind-hull)

Para hablar de las características de una hélice hay que diferenciar entre su comportamiento con el propulsor aislado (open waters) y su comportamiento teniendo en cuenta la influencia del casco del buque (behind-hull), en el cual la hélice trabaja en un campo de velocidades de estela producido por el casco.

El cálculo de la hélice VP1304 del que trata este proyecto está realizado en condiciones de propulsor aislado (open waters). En estas condiciones se mide el momento y el empuje producido por la hélice trabajando en un flujo uniforme. Y por tanto las características obtenidas con el propulsor aislador (open waters) de la hélice son de carga uniforme.

Ciertamente el ensayo de aguas abiertas sirve como primera etapa del desarrollo del proyecto de la hélice y cuando ya se tiene avanzado el diseño se comienza a trabajar sobre el comportamiento de la hélice acoplado al casco.

3.2 Tipos de bancos de ensayos para la caracterización de propulsores

Cuando se quieren realizar cálculos sobre el prototipo de una hélice nueva u optimizar un diseño existente se puede acudir bien a la vía experimental o bien a la simulación computacional. En lo que respecta a la vía de desarrollo experimental el trabajo se lleva a cabo en canales hidrodinámicos.

El canal hidrodinámico más conocido en España es el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) creado por la Armada Española en 1928. Cuya misión fundamental es el estudio, la experimentación y la investigación de los aspectos hidrodinámicos de la construcción naval militar, mercante, pesquera y deportiva. Esta misión está recogida en el Real Decreto de reorganización 451/1995 de 24 de marzo. Información recogida en su página web. [3]

A la hora de realizar la experimentación en los canales se tienen varias modalidades de ensayos hidrodinámicos. Se destacan dos de ellos porque ambos se utilizan para la caracterización de hélices de propulsión

- Canal de aguas tranquilas (Towing Tank).
- Túnel de cavitación (Cavitation Tunnel).

3.2.1 Canal de aguas tranquilas (Towing Tank)

Es un canal hidrodinámico en el cual se realizan experiencias hidrodinámicas, no sólo con hélices sino también con prototipos de cascos, barcos, etc. Como se puede apreciar

en **Figura 3-1**, a la izquierda se puede ver el carro donde se monta lo que se quiera medir y a la derecha se puede ver el canal.

Las dimensiones de un canal hidrodinámico suelen ser de unos cuantos metros de ancho y de cientos de metros de largo. Disponen de un carro remolcador el cual se desliza por encima del canal sobre unas vías que tiene a lo largo del mismo. El carro puede remolcar la hélice o puede seguir a un prototipo autopropulsado. Va equipado con ordenadores y dispositivos para medir los diferentes parámetros: velocidad, empuje, par, etc. Además aunque no interese para el cálculo en hélices, algunos tienen la posibilidad de crear olas, pudiendo modificar su tamaño y periodo lo que resulta de enorme interés para conducir ensayos de estabilidad dinámica de buques.

El canal de aguas tranquilas del CEHIPAR mide 320 metros de largo, 12.5 metros de ancho y 6.5 metros de profundidad. El Carro Remolcador alcanza velocidades de ensayo de hasta 10 m/s, con una aceleración máxima de 1 m/s². Se puede obtener más información en la referencia [3].



Figura 3-1 Towing Tank [16]

3.2.2 Tunel de Cavitación (Cavitation Tunnel)

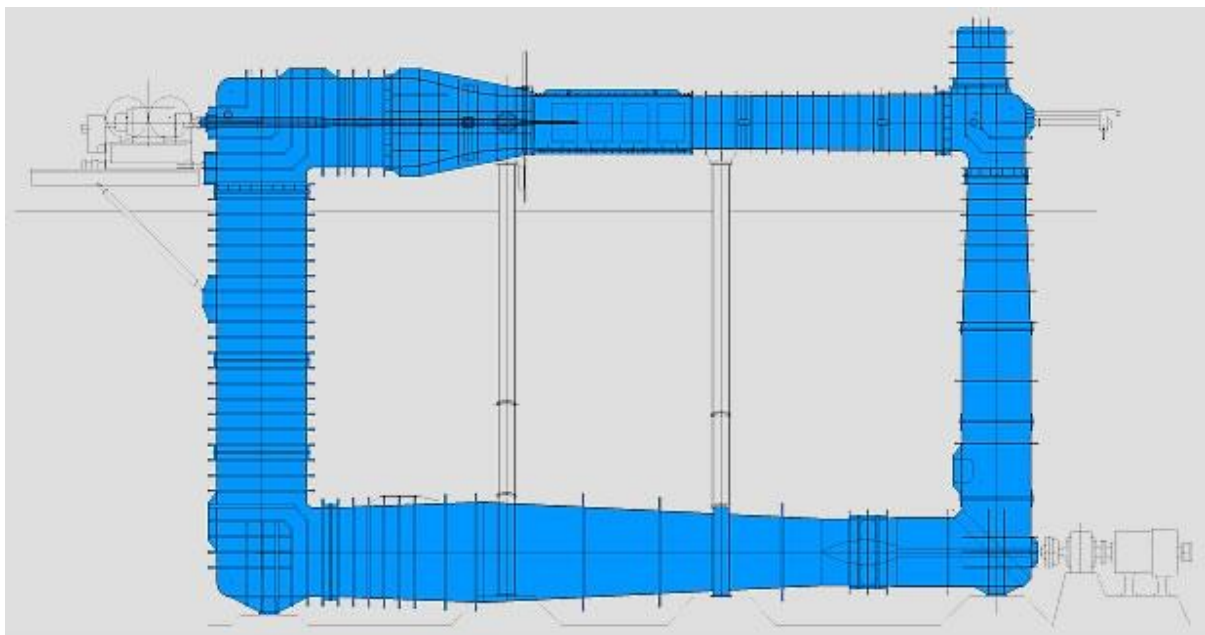


Figura 3-2 Túnel de cavitación [8]

Los túneles de cavitación se usan para estudiar las hélices con mayor profundidad. Un túnel de cavitación consiste en un circuito formado por tuberías de gran diámetro. En él se pueden realizar mediciones de la hélice en flujo libre o por lo contrario simulando la estela del buque con una réplica del casco. La hélice se introduce en el circuito, montada en un dinamómetro, y donde se puede medir par, empuje y detectar cavitación. Además mide con un dispositivo no intrusivo, un láser doppler, la velocidad del fluido en diferentes puntos alrededor de la hélice con precisión, campo de velocidades. Gracias a esto se obtiene información del fluido en determinadas regiones:

- Estela producida por las palas de la hélice.
- Fluido acelerado en las palas de la hélice principalmente en las caras de succión.
- Fluido decelerado cerca del núcleo en las caras de presión de las palas.
- Fluido acelerado en los remolinos próximo al “tip” de la pala.
- Fluido decelerado en los remolinos próximo al “tip” de la pala.

En ellos podemos modificar la velocidad del flujo, que sería la velocidad de avance de la hélice, gracias a sistema de bombeo de agua. También se puede modificar de forma independiente las revoluciones a las que gira la hélice.

En la **Figura 3-2** se puede ver el esquema de un túnel de cavitación. En la parte superior se introduce la hélice en su eje y se puede observar por las ventanas que dispone en la parte central del tubo, como se puede observar en la **Figura 3-3**. En la parte inferior derecha podemos apreciar un dispositivo cuya misión es controlar y proporcionar al fluido la velocidad necesaria para el ensayo. Todo el recorrido dispone de una serie de estrechamientos y ensanchamientos además de otros elementos cuya misión es la de garantizar un flujo uniforme en la hélice.

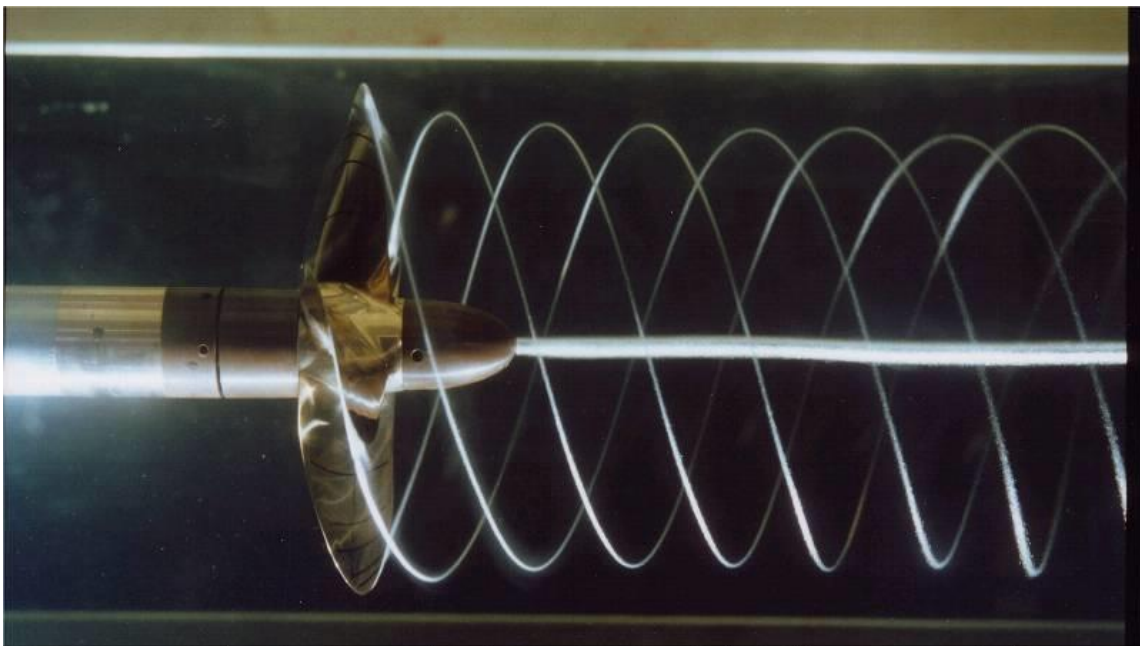


Figura 3-3 Hélice en tubo de cavitación. [4]

3.3 Desarrollo experimental En Canal de Aguas Tranquilas

En este apartado se va a describir como se hizo el ensayo experimental de la hélice en open waters según el informe proporcionado por el autor en [8].

Lo primero que hay que hacer es comprender como se va a realizar el ensayo experimental. En la Figura 3-4 se puede ver un esquema de lo que se hace con la hélice para realizar el ensayo experimental.

La hélice trabaja a popa del buque unida al eje, el cual le transmite el par para crear el movimiento. Como se puede apreciar en la parte superior de la Figura 3-4.

Sin embargo para trasladar la hélice al canal de aguas tranquilas en el cual la hélice va a trabajar con un flujo axial uniforme de agua es necesario conectarla al eje por el otro lado. Como se puede apreciar en las Figura 3-4 y Figura 3-5 la hélice sigue girando en el mismo sentido, dextrógira, sin embargo, está conectada al eje que le trasmite el par por la popa. Además se le ha colocado en la proa una superficie cónica con la idea de mejorar su penetración en el fluido.

Antes de comenzar el ensayo experimental se calculará como influyen todo los elementos al funcionamiento de la hélice con la idea de conseguir aislarla de ellos y obtener resultados exclusivos de las palas de la hélice. A continuación se detalla éste proceso y como se ha realizado el ensayo.

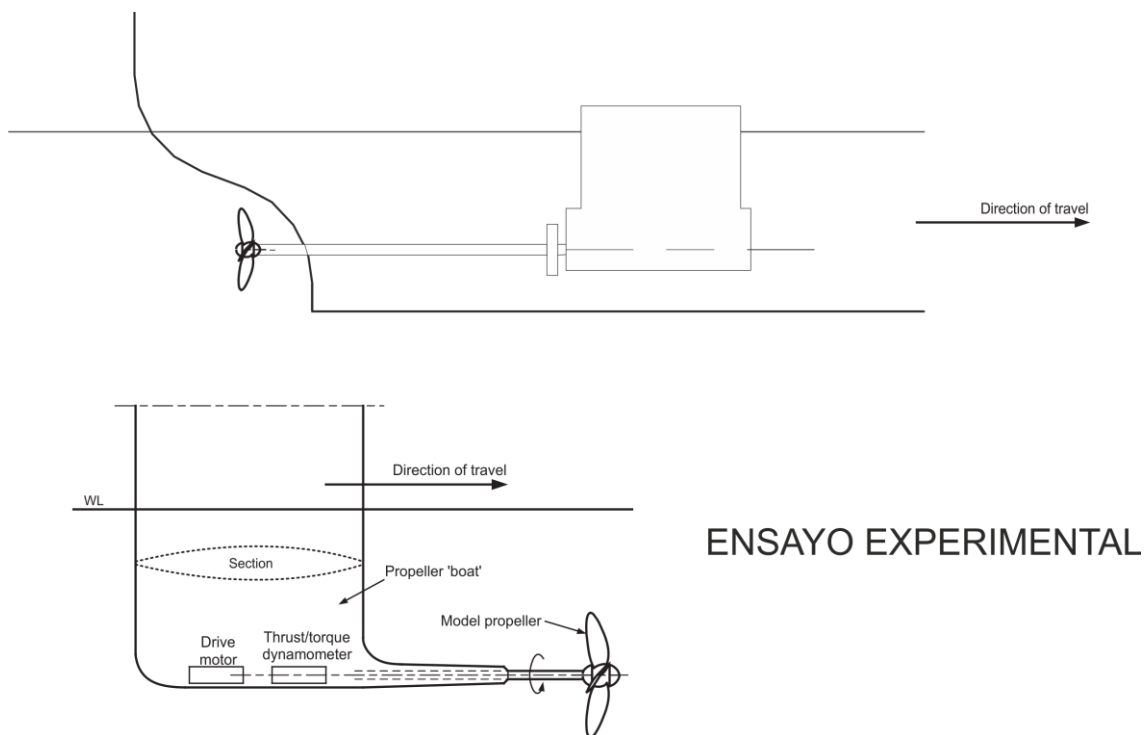


Figura 3-4 Explicación Ensayo Esperimental. Open Water. [9]

Las características en aguas abiertas se midieron con dos números de revoluciones distintos ($n = 10$ y 15 s^{-1}), con el fin de evaluar la dependencia del número de Reynolds. Que los ensayos a $n = 10$ y $n = 15 \text{ s}^{-1}$ den resultados tan similares permite

asegurar que en ese rango de operación el número de Reynolds es muy elevado y por tanto pueden utilizarse las leyes de semejanza parcial.

Para las mediciones experimentales con el propulsor aislado (open waters), además de calibrarse el dispositivo de medición, se realizaron diferentes ensayos para medir el par y la resistencia ofrecidos por el hub de la hélice para poder aislarlo de los resultados obtenidos en el ensayo de la hélice. El hub utilizado en el ensayo es de la misma masa y forma que el de la hélice real.

Por lo tanto la primera prueba 11F0391 se realizó a velocidad de avance $V = 0$ m/s el objetivo es medir el par y la resistencia ofrecidos por el fluido al pasar por el hueco (gap) que hay entre el núcleo (hub) y el eje del dinamómetro. También se obtiene información de la resistencia obtenida por los cojinetes.

El tratamiento de los resultados experimentales sigue el procedimiento estandarizado 7.5-02-03-02.1 emitido por la conferencia internacional de Canales de Aguas Tranquilas, el cual establece como debe realizarse el ensayo experimental en esas condiciones y permite independizar los resultados de la hélice del canal en el que fue realizado.

El procedimiento estandarizado 7.5-02-03-02.1 trata cuestiones de modelo e instalación (dimensiones mínimas del canal, instrumentos utilizados), aparatos de medida, como hacer las mediciones, calibración y validación en los ensayos experimentales en un Canal de Aguas Tranquilas. En la referencia [17] se encuentra la norma completa.

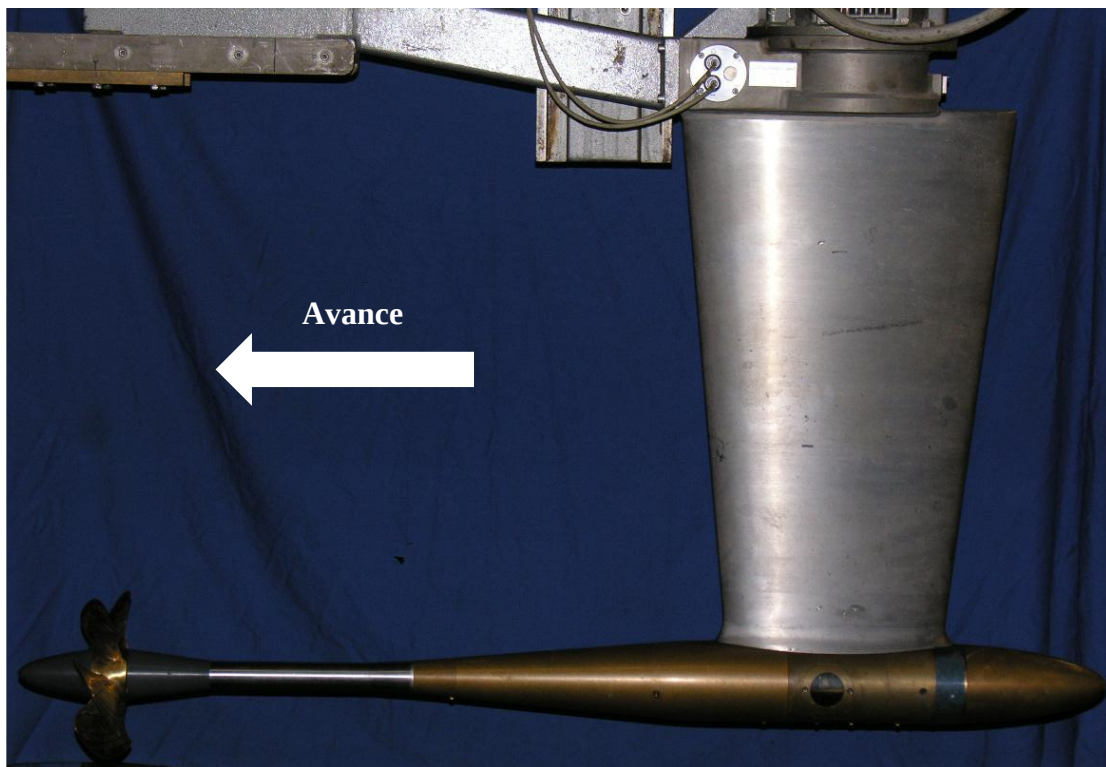


Figura 3-5 Hélice VP1304 montada en el Carro del Test. [8]

Las pruebas 11F0392 y 11F0393 se realizaron para calcular el par y la resistencia ofrecida por el hub para diferentes coeficientes de avance. Esta prueba se realiza con la hélice sin palas como se muestra en Figura 3-6.



Figura 3-6 Hélice VP1304 sin palas. [8]

Por tanto los resultados obtenidos en los tests siguientes, con el fin de obtener el par y empuje proporcionados únicamente por las palas, se modificarán por los coeficientes del hub obtenidos de los test anteriores.

3.4 Adimensionalización de las variables de funcionamiento

El modo más conveniente para representar las relaciones entre las variables de operación y la geometría de un propulsor es hacerlo mediante grupos adimensionales.

La técnica del Análisis Dimensional permite comprimir la información que se obtiene de desarrollos teóricos y ensayos experimentales. El análisis dimensional permite reducir el número y la complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado.

Los diferentes grupos adimensionales que se usan para definir el funcionamiento general de una hélice son:

$$\text{Coeficiente de Empuje: } K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$\text{Coeficiente de Par: } K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$\text{Coeficiente de Avance: } J = \frac{V_a}{nD}$$

$$\text{Número de Reynolds: } R_n = \frac{\rho n^2}{\mu}$$

$$\text{Rendimiento: } n_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} = \frac{TV_a}{2\pi nQ}$$

Además el Análisis Dimensional establece las bases para aplicar la semejanza física que permite predecir el comportamiento de un prototipo a partir de los resultados

ensayados en un modelo. Por tanto facilita el diseño y la selección del propulsor para un determinado rango de operación.

Por lo tanto se puede aplicar el mismo análisis dimensional a hélices con una geometría similar (en este caso la familia de hélices que son “Wageningen B-Series”).

Se puede decir que el empuje de una hélice cuando trabaja suficientemente alejada de la superficie, lo suficiente para no crear olas, depende de los siguientes parámetros:

1. Diámetro de la hélice (D).
2. La Velocidad de Avance (V_a).
3. Velocidad de rotación de la hélice (n).
4. La densidad del fluido (ρ).
5. La viscosidad del fluido (μ).
6. La presión estática del fluido en la hélice ($p_0 - e$). Donde p_0 es la presión absoluta en el eje de la hélice y e es la presión de vapor a temperatura ambiente.

Por tanto se puede asumir que el empuje (T) será proporcional a: ρ , D , V_a , n , μ y $(p_0 - e)$. Donde:

$$T = p^a D^b V_a^c n^d \mu^f (p_0 - e)^g$$

Por tanto para que sea correcto dimensionalmente, el empuje es una fuerza ($N = \text{ma} = MLT^{-2}$):

$$MLT^{-2} = (ML^{-3})^a L^b (LT^{-1})^c (T^{-1})^d (ML^{-1}T^{-1})^f (ML^{-1}T^{-2})^g$$

Donde resolviendo la ecuación se obtiene:

$$T = \rho n^2 D^4 \left(\frac{V_a}{nD} \right)^c \left(\frac{\mu}{\rho n D^2} \right)^f \left(\frac{p_0 - e}{\rho n^2 D^2} \right)^g$$

Donde los siguientes grupos adimensionales son conocidos:

Coeficiente de Empuje: $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$

Coeficiente de Avance: $J = \frac{V_a}{nD}$

Número de Reynolds: $R_n = \frac{\rho n^2}{\mu}$

Número de Cavitación: $\sigma_0 = \frac{p_0 - e}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$

De donde K_T es función de los grupos adimensionales de coeficiente de Avance, número de Reynolds y número de Cavitación.

$$K_T = f(J, R_n, \sigma_0) = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

La derivación del coeficiente de par K_Q es análoga a la del coeficiente de empuje K_T . Se consideran las mismas dependencias y por lo tanto el par se puede considerar función de:

$$Q = \rho^a D^b V_a^c n^d \mu^f (p_0 - e)^g$$

Y por tanto, resolviendo, se llega a:

$$Q = \rho n^2 D^5 \left(\frac{V_a}{nD} \right)^c \left(\frac{\mu}{\rho n D^2} \right)^f \left(\frac{p_0 - e}{\rho n^2 D^2} \right)^g$$

Donde:

$$K_Q = g(J, R_n, \sigma_0) = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

En la Figura 3-7 se puede ver la gráfica de los resultados obtenidos experimentalmente. El coeficiente de avance J es el grupo adimensional independiente (Depende de variables independientes fijadas en el ensayo), mientras que el coeficiente de empuje K_T y el coeficiente de par K_Q son grupos adimensionales dependientes. Para facilitar la representación en una única gráfica se representa el coeficiente de par multiplicado por 10.

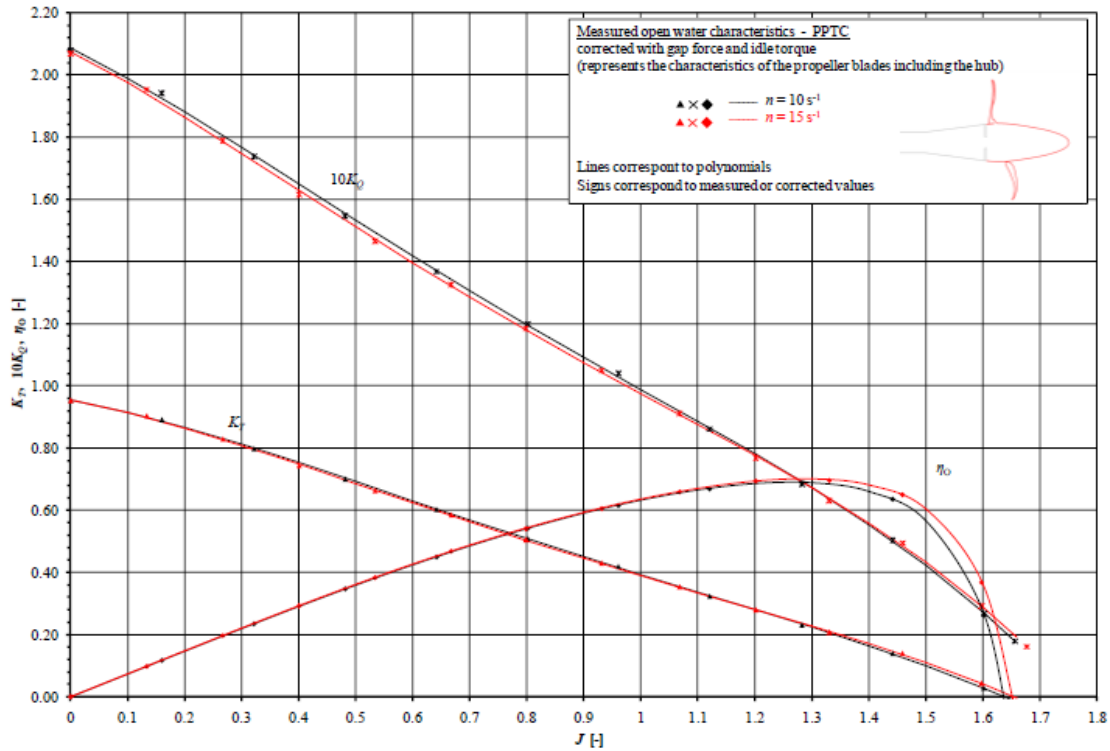


Figura 3-7 Curva Característica de la Hélice VP1304 en open waters [8].

4 METODOLOGÍA NUMÉRICA

En este capítulo de la memoria se realiza el estudio CFD de la hélice VP1304. En primer lugar se trabaja con el CAD de la hélice realizando comprobaciones sobre la geometría, definiendo el dominio computacional y preparándola para el cálculo. A continuación se realiza la malla y se establecen las condiciones de contorno de las diferentes superficies. Por último se realiza la simulación de la hélice para sus diferentes puntos de trabajo y se analizan y comprueban los resultados obtenidos en el post-procesado.

En la Figura 4-1 se puede ver el traslado de la hélice desde el ensayo experimental a la simulación en CFD. Donde se aprecia la creación de un dominio computacional que se explica a continuación.

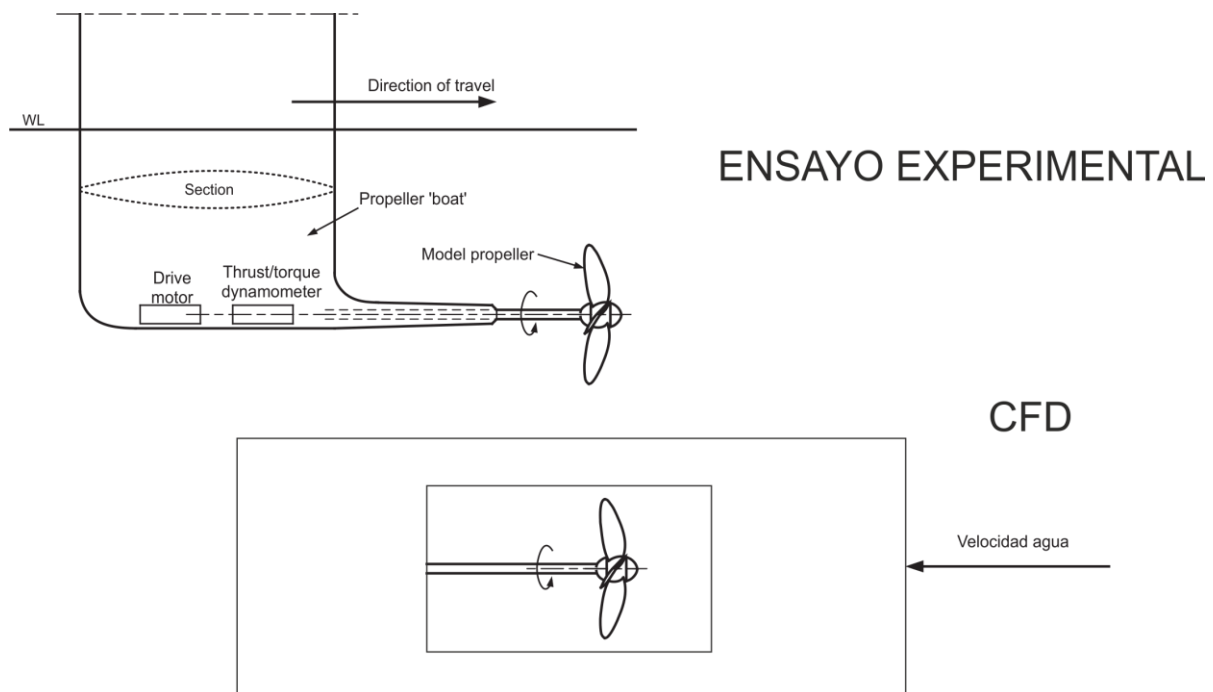


Figura 4-1 Esquema del paso de ensayo experimental a simulación. [9]

4.1 CAD

Para trabajar con el modelo CAD facilitado se ha utilizado un programa de CAD. Dentro del material proporcionado por la empresa SVA Hydrodynamic Solutions encontramos dos archivos CAD. Uno más detallado de la hélice el cual incluye el hueco (gap) que hay entre núcleo (hub) de la hélice y el eje del dinamómetro y un segundo archivo al que se le han realizado operaciones de limpieza de geometría.

El segundo archivo está simplificado ya que se han suprimido holguras requeridas para el movimiento de partes móviles de la hélice. Sin embargo esto no afecta a la hidrodinámica de la hélice una vez fijada una determinada orientación de las palas. (Véase Figura 4-2) Este segundo archivo es el archivo CAD de inicio para el desarrollo del TFG.

En este apartado se abordarán las comprobaciones sobre la geometría de la hélice y la obtención de los volúmenes de los dominios computacionales.

4.1.1 Operaciones Comprobación de la Geometría

Lo primero que se hace es el reconocimiento de la geometría de la hélice. Se procede a comprobar las distintas características geométricas de la hélice.

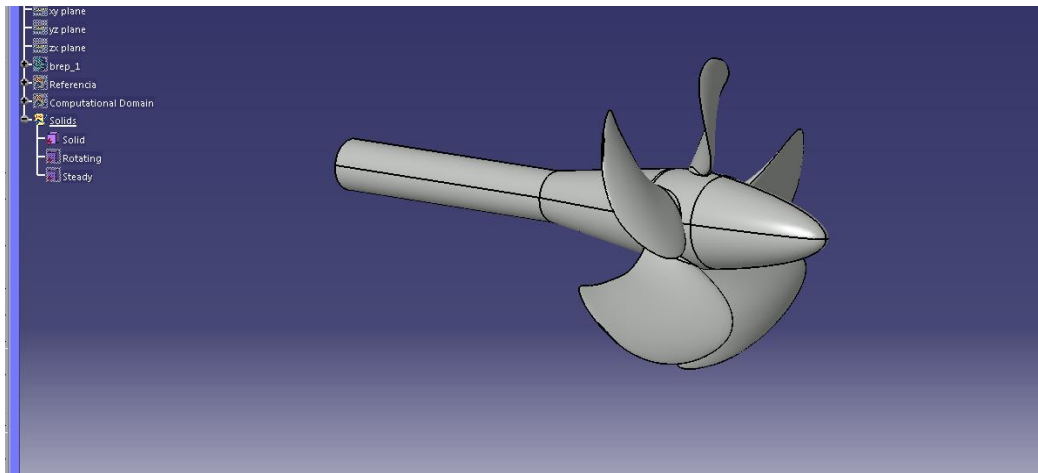


Figura 4-2 CAD Hélice VP1304.

Para comprobar el diámetro de la hélice se crea una superficie cilíndrica que contenga los puntos de las palas más alejados del eje de la hélice. Comprobamos como se aprecia en la Figura 4-3 que el diámetro de la hélice es $D = 0.25 \text{ m}$.

Para medir el diámetro del núcleo (hub) de la hélice o el diámetro de la raíz de la pala se opera del mismo modo. También se puede medir distancia entre la pala y el eje de la hélice para obtener el diámetro ($d_h = 0.075 \text{ m}$), como se puede ver en la Figura 4-4. Y por tanto se deduce que la relación entre el diámetro del hub y el diámetro de la pala ($\frac{d_h}{D} = 0.3$), como se puede ver en las medidas de la hélice en la Tabla 2.

Diámetro	D	[mm]	250
Paso $r/R=0.7$	$P_{0.7}$	[mm]	408.7500
Paso $r/R=0.75$	$P_{0.75}$	[mm]	407.3804
Cuerda $r/R=0.7$	$C_{0.7}$	[mm]	104.1670
Cuerda $r/R=0.75$	$C_{0.75}$	[mm]	106.3476
Relación Paso $r/R=0.7$	$P_{0.7}/D$	[-]	1.635
Relación de Área	A_E/A_o	[-]	0.77896
Skew	θ_{EXT}	[°]	18.837
Relación d_h/D	d_h/D	[-]	0.300
Número de palas	Z	[-]	5
Sentido de Rotación		[-]	A derechas.
Tipo de hélice		[-]	Hélice de Paso Controlable.

Tabla 2 Datos de la Hélice VP1304 [8].

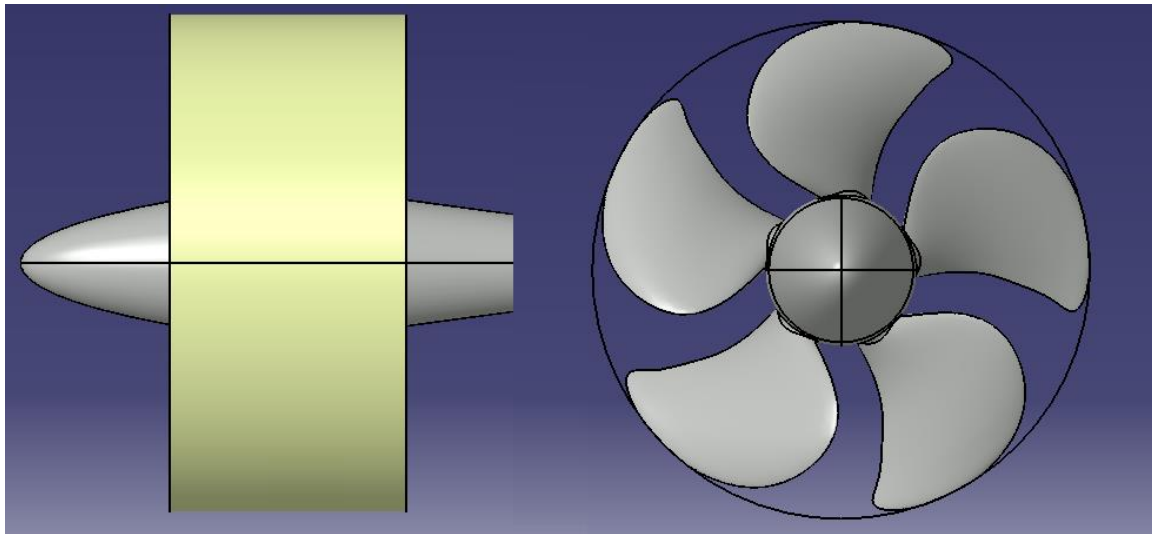


Figura 4-3 Diámetro hélice y diámetro de punta de las palas

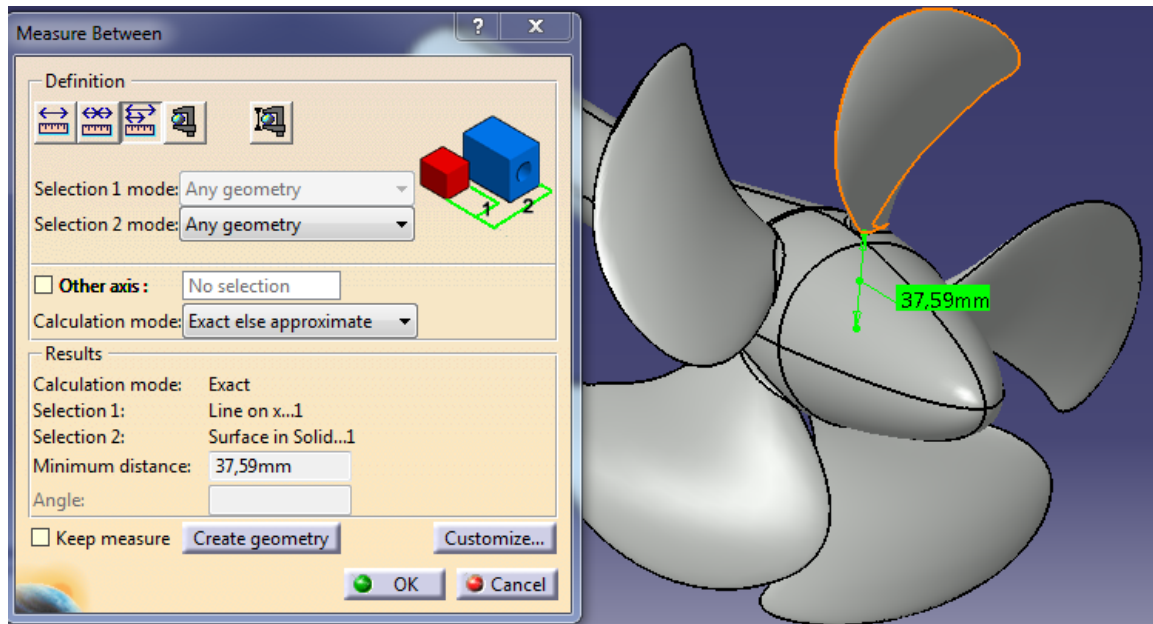


Figura 4-4 Diámetro raíz de las palas

A continuación se van a realizar mediciones de paso de la hélice y cuerda a una determinada distancia del eje de la hélice. Una de las formas de hacerlo es realizar un desarrollo de una sección de la pala de la hélice a esa altura.

Por tanto, en primer lugar, se van a realizar desarrollos cilíndricos de la secciones de las palas de la hélice a determinadas alturas. En primer lugar, se crea una superficie cilíndrica con el mismo eje de revolución que la hélice y con el radio determinado. A continuación se realiza la intersección de la superficie con las palas de la hélice y después se hace el desarrollo de la superficie, como se puede observar en Figura 4-5.

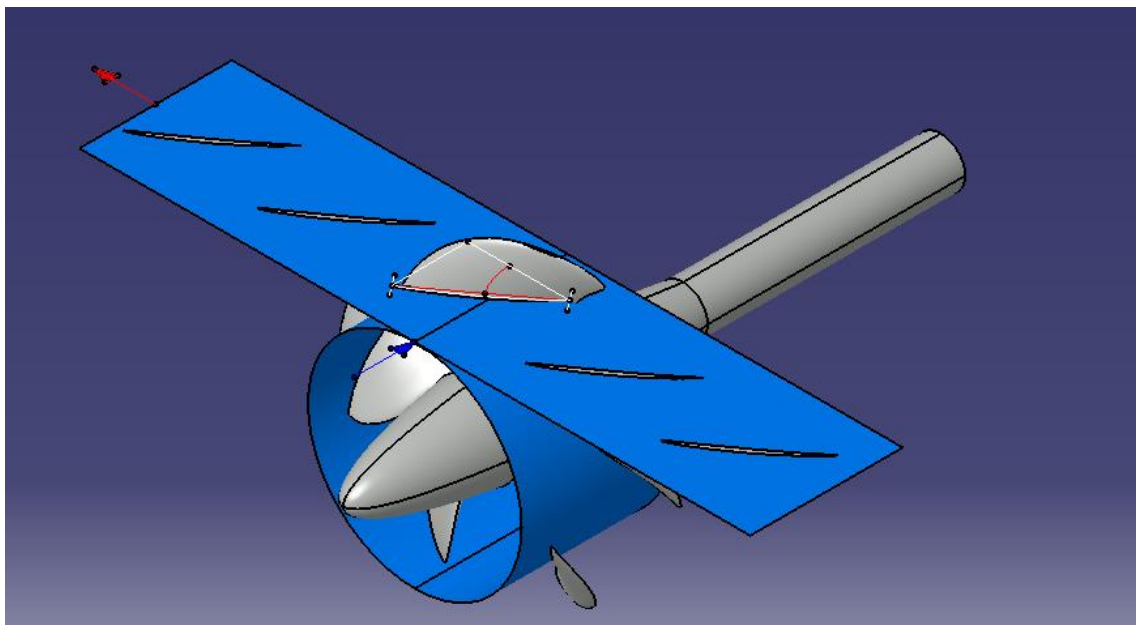


Figura 4-5 Desarrollo $r/R = 0.75$.

Si se realiza esta misma operación para $r/R = 0.5$ y para $r/R = 0.7$ se obtienen desarrollos cilíndricos de varias secciones de la pala de la hélice las cuales sirven para ver

mejor la geometría de la hélice. En la Figura 4-6 se pueden observar las tres intersecciones de las diferentes superficies cilíndricas sobre la pala de la hélice.

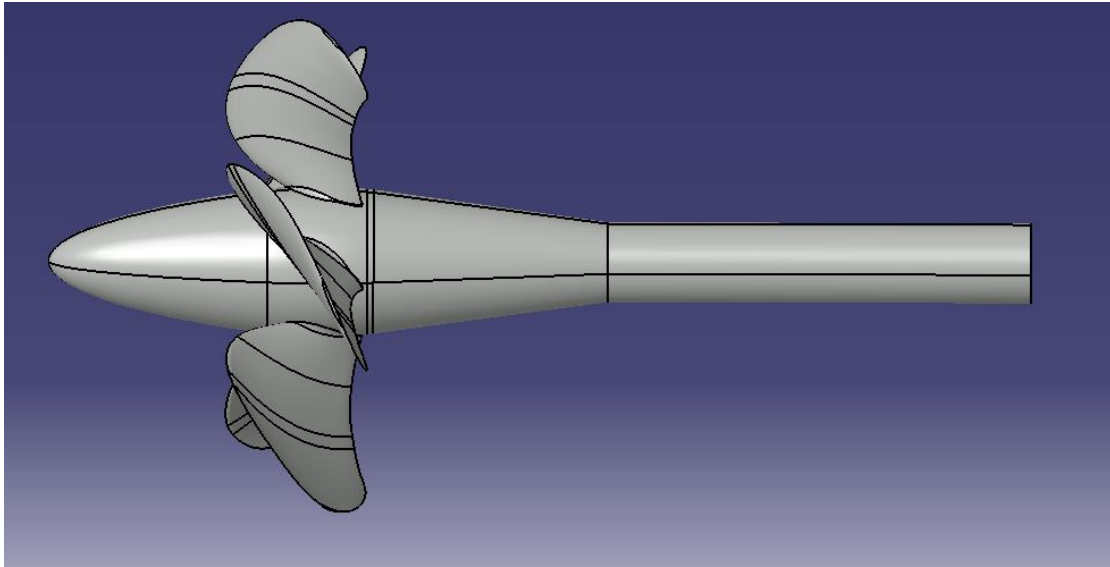


Figura 4-6 Secciones pala de la Hélice 1.

En la Figura 4-7 se pueden ver las tres diferentes secciones (para diferentes radios) de la pala de la hélice desarrolladas.

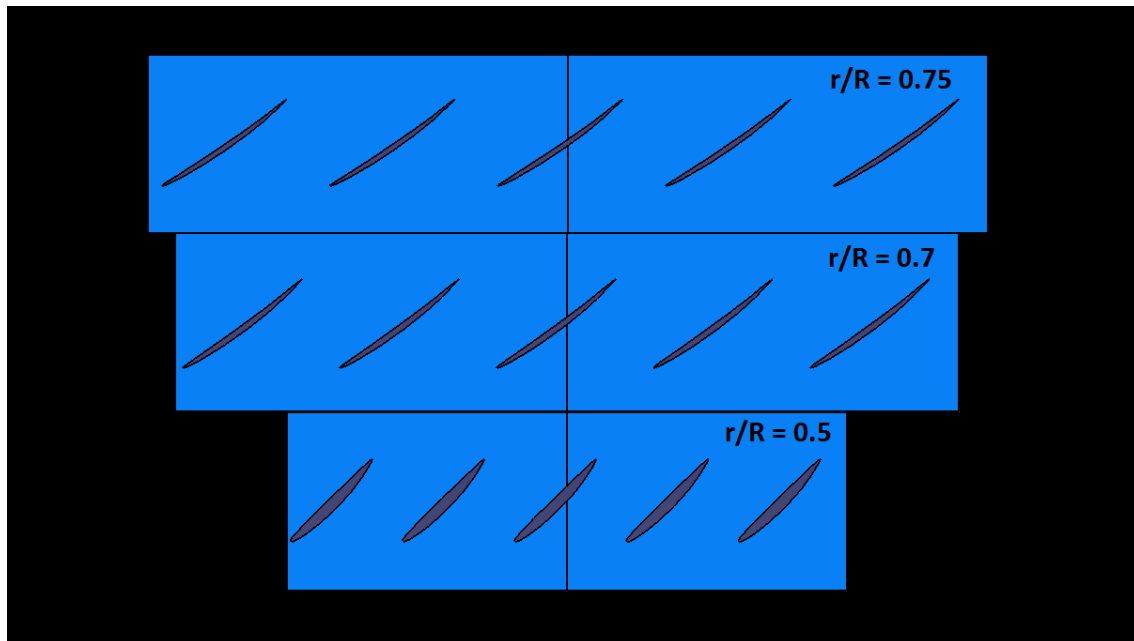


Figura 4-7 Secciones pala de la Hélice 2.

Una vez realizados los desarrollos de las secciones de la pala de la hélice es mucho más sencillo calcular el paso de la hélice para una determinada relación de radios. (r/R).

Se va a calcular una vez, por ejemplo para $r/R = 0.7$, para comprobar que las características de la hélice son correctas y para calcular el resto se procedería por tanto de la misma forma.

Sobre el desarrollo de la sección de la hélice para $r/R = 0.7$ se crea una recta contenida dentro de la sección del álabe de la hélice y que va desde el borde de ataque (leading edge) del álabe al borde de desprendimiento (trailing edge). A continuación se mide el ángulo que forma esta recta con una recta contenida en el plano y paralela a la dirección del eje de rotación de la hélice, como se puede observar en la Figura 4-8.

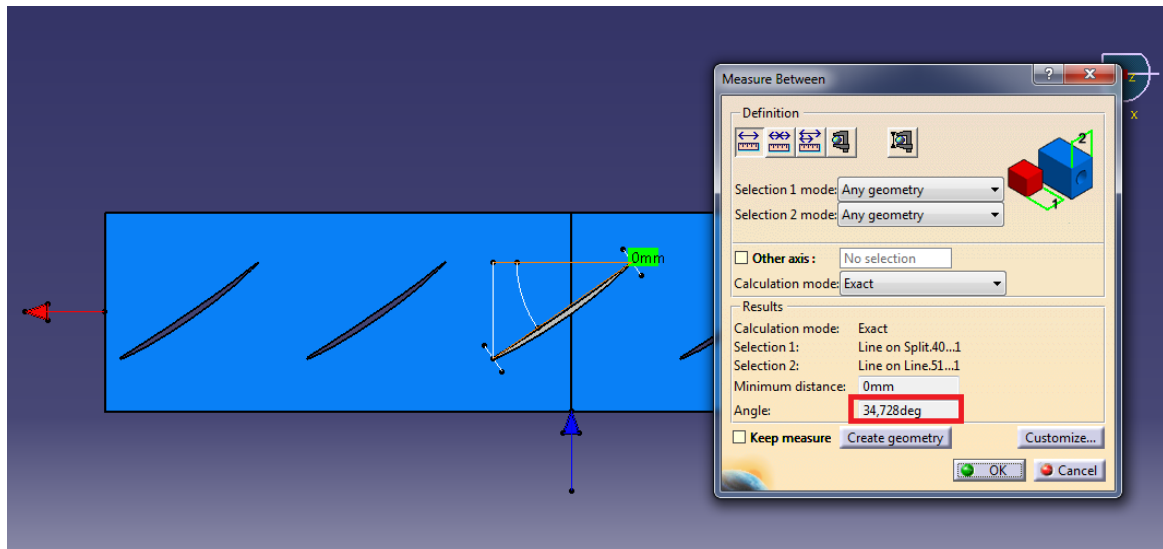


Figura 4-8 Cálculo Paso Hélice $r/R = 0.7$.

Para medir en CAD el paso que tiene la hélice en un determinado punto (r/R) es necesario saber el ángulo que forma la pala de la hélice como se explicó en el apartado **Paso (Pitch)** de la memoria.

En este caso $\theta = 34.728^\circ$, por tanto:

$$Paso = 2\pi(0.7R) \tan \theta_p = 408.30 \text{ mm}$$

Si lo comparamos con el resultado especificado por el fabricante, el cual se puede ver en la **Tabla 2**, es bastante aproximado.

Por último se va a realizar una medición de la cuerda de una pala de una hélice para $r/R = 0.7$. Esta medición se puede realizar también sobre el desarrollo de las secciones de la pala de la hélice. Como se puede ver en la la cuerda para $r/R = 0.7$ es $C=107.445 \text{ mm}$, cuyo valor es muy similar al que viene detallado por el fabricante y el cual podemos ver en la **Tabla 2**.

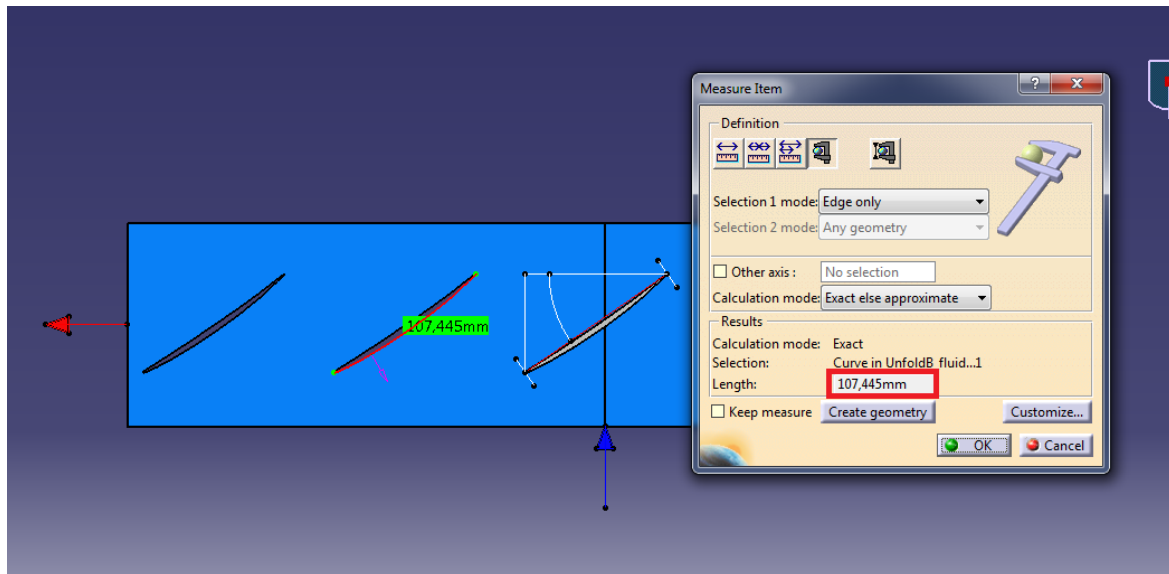


Figura 4-9 Medición cuerda $r/R = 0.7$.

4.1.1 Dominios

Para el cálculo de la hélice se ha utilizado MRF (Multi-Rotating Reference Frame). Se puede aplicar MRF siempre y cuando la superficie que tengan en común un dominio rotativo y el dominio estacionario sea una superficie de revolución centrada en el eje de giro del dominio rotativo. Por tanto MRF es aplicable a hélices que cumplan esta condición: hélices de paso controlable, fijo, pod's, etc. Sin embargo para hélices con tobera o hélices contra rotatorias MRF no sería válido y habría que implementar SMM (Sliding Mesh Model).

Para este proyecto el dominio computacional está dividido entre zona estacionaria y zona rotativa. Con MRF puede haber más de una zona rotativa, las cuales pueden girar a distintas velocidades, en este caso solo habrá una zona rotativa y una zona estacionaria

Dominio interior, como se puede ver en la Figura 4-10, es aquel que envuelve a la hélice y a su vez está envuelto por el dominio estacionario. Al ser un dominio rotativo, se le introduce la misma velocidad de rotación de la hélice para el cálculo.

El dominio rotativo es un cilindro que envuelve a la hélice con un radio de 187.5mm (1.5 veces el radio de la hélice). Donde la superficie a proa (upstream) de la hélice (int_1) está situada a 250mm ($2 R_H$) de las palas de la hélice y la superficie a popa (downstream) de la hélice (int_2) está situada a 356mm y es tangente al final del eje de la hélice.

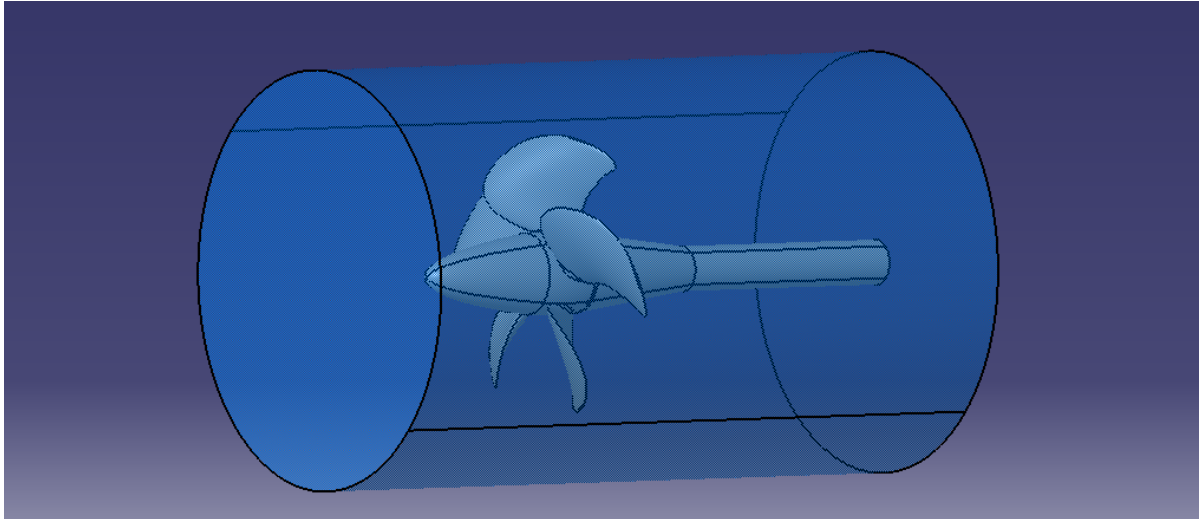


Figura 4-10 Dominio Zona Rotativa.

Dominio exterior, como se puede ver en Figura 4-11, que simula las condiciones de flujo axial estacionario. Al no estar presente en el cálculo el casco del buque (open waters) podemos decir que alrededor de la hélice habrá un flujo axial estacionario del fluido.

El dominio estacionario será un cilindro que envuelve al dominio rotativo con un radio de 375mm ($3 R_H$). Donde la superficie a proa (upstream) de la hélice (o inlet) estará situada a 500mm ($4 R_H$) de las palas de la hélice y la superficie a popa (downstream) de la hélice (o outlet) estará a 1000mm ($8 R_H$) de las palas de la hélice.

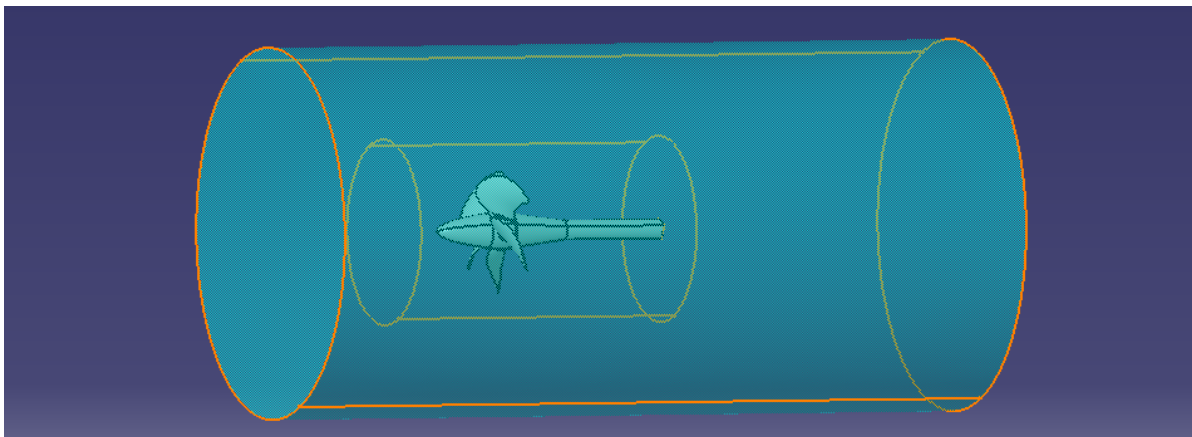


Figura 4-11 Dominio Zona Estacionaria.

Para establecer el tamaño de estos volúmenes hay que buscar un equilibrio. Para un mismo tamaño de celda en la malla, con un volumen demasiado grande se obtendría una malla con muchas celdas y esto desencadenaría en un gran esfuerzo computacional y en grandes tiempos de proceso. Sin embargo si se establece un volumen pequeño se obtendría una malla más reducida pero daría lugar a un mayor error en el cálculo.

A la hora de exportar el CAD de la hélice al programa para mallar (GMESH) se tendrá todo lo anterior en cuenta. Por tanto se crearán tres volúmenes: el de la propia hélice, el del dominio interior y el del dominio exterior.

4.2 MALLADO

En este apartado se va a proceder al mallado del dominio computacional. También se abordarán temas que hay que tener en cuenta para la realización de la malla. El programa utilizado para el mallado ha sido el GMESH.

4.2.1 Importación y Preparación de los Volúmenes

Una vez que están listos los volúmenes en el CAD, con los que vamos a trabajar en el programa para realizar la malla (GMESH), hay que guardarlos en formato STEP (.stp). Una vez guardados, se abre el GMESH y se selecciona la opción de importar STEP.

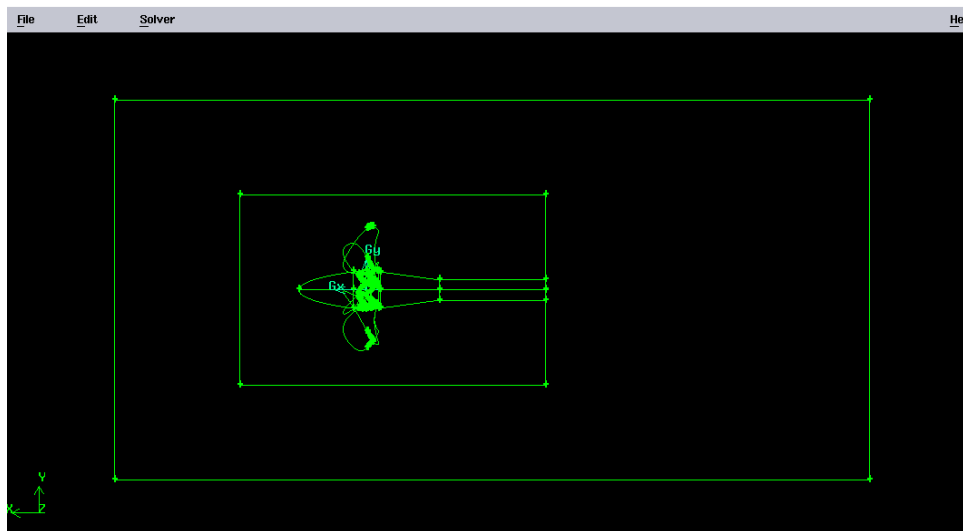


Figura 4-12 Volúmenes importados en GMESH.

Antes de empezar con el mallado es necesario realizar una serie de operaciones para que no provoque problemas la geometría en operaciones posteriores.

Para la realización de este proyecto la geometría no se ha realizado en CAD desde cero, es decir, la geometría de la hélice ha sido facilitada por SVA Hydrodynamics Solutions. Sin embargo a la hora de crear o preparar un modelo en CAD es necesario tener en cuenta una serie de aspectos. Hay que prestar especial atención a la hora de generar la geometría para que posteriormente a la hora de mallar y realizar la simulación numérica no haya complicaciones. Estos aspectos son:

- Duplicidad de elementos. Evitar elementos dobles que pueden ser un inconveniente para el posterior mallado de los volúmenes.
- Unión de Superficies.
- Existencia de Singularidades.
- Coherencia de Unidades. Todas las partes creadas sobre las mismas unidades.
- Origen de Coordenadas. Todos los cálculos posteriores estarán asociados al origen de coordenadas sobre el que construye la geometría.

- Alisado. Superficie de la hélice con una rugosidad relativa cero (superficie lisa ideal).

Concretamente para la realización de este proyecto se han unido caras duplicadas, superficies contiguas y simplificado singularidades. Al importar los tres volúmenes el programa lo que hace es formar los cuerpos con sus caras independientes. De esta manera se generan caras repetidas. Para unir las caras duplicadas existe una opción (Clean Up Duplicate Faces) en el programa GMESH. Esta función identifica las caras que están duplicadas o comprendidas entre dos volúmenes y las une dando como resultado una única cara, como se puede ver en la Figura 4-13. Se puede hacer de manera automática a través del programa o realizarlo manualmente seleccionando las caras que se quieren unir dos a dos.

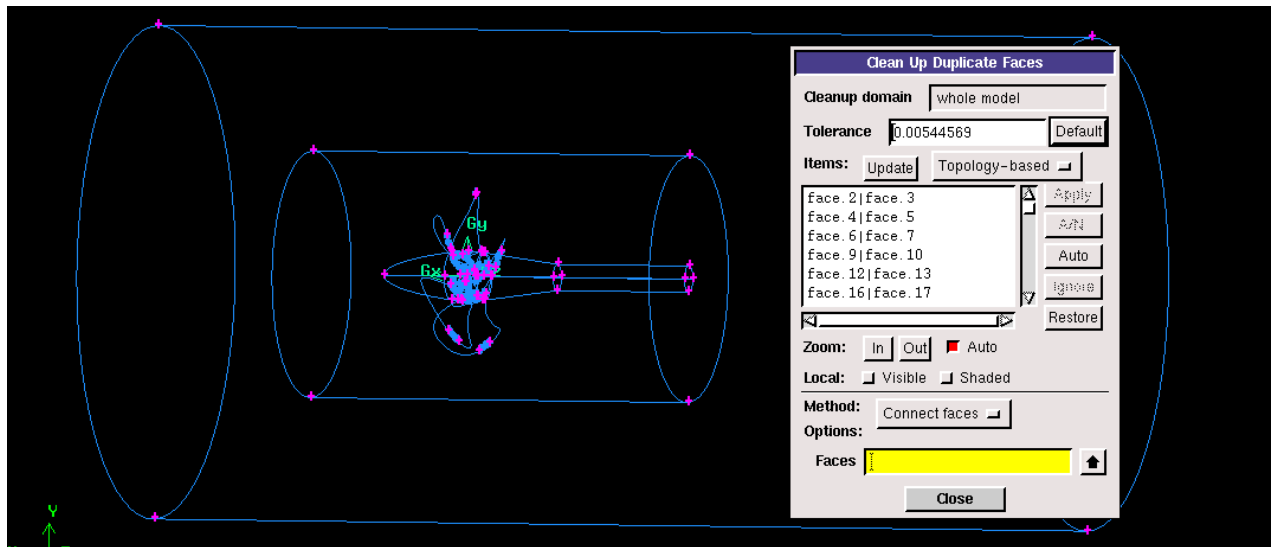


Figura 4-13 Unión de Caras Duplicadas. GMESH.

Además, previo al mallado de los volúmenes, se simplificaron algunas superficies contiguas. Esto es porque hay algunas zonas de la hélice formadas por caras muy pequeñas que pueden originar nodos muy próximos que a su vez empeoren la calidad de la malla, como se puede ver en la Figura 4-14. Por tanto se unieron las superficies cercanas al núcleo (hub) y las palas de la hélice. Para esto Gmsh tiene una opción (Merge Faces) que permite ir uniando uno a uno estas superficies, como se puede ver en la Figura 4-15.

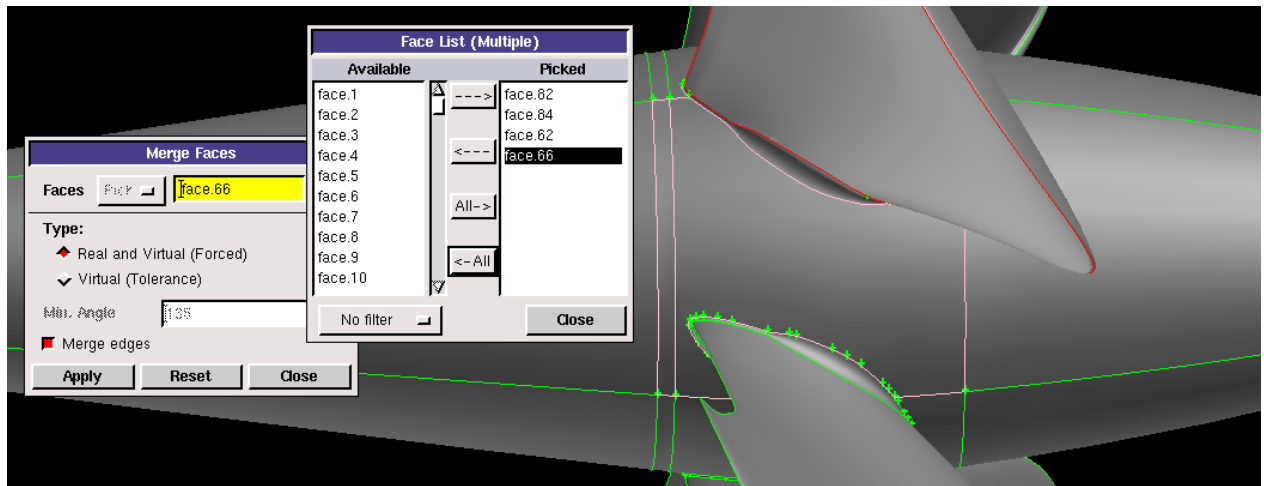


Figura 4-14 Antes de Unir Superficies. GMSH.

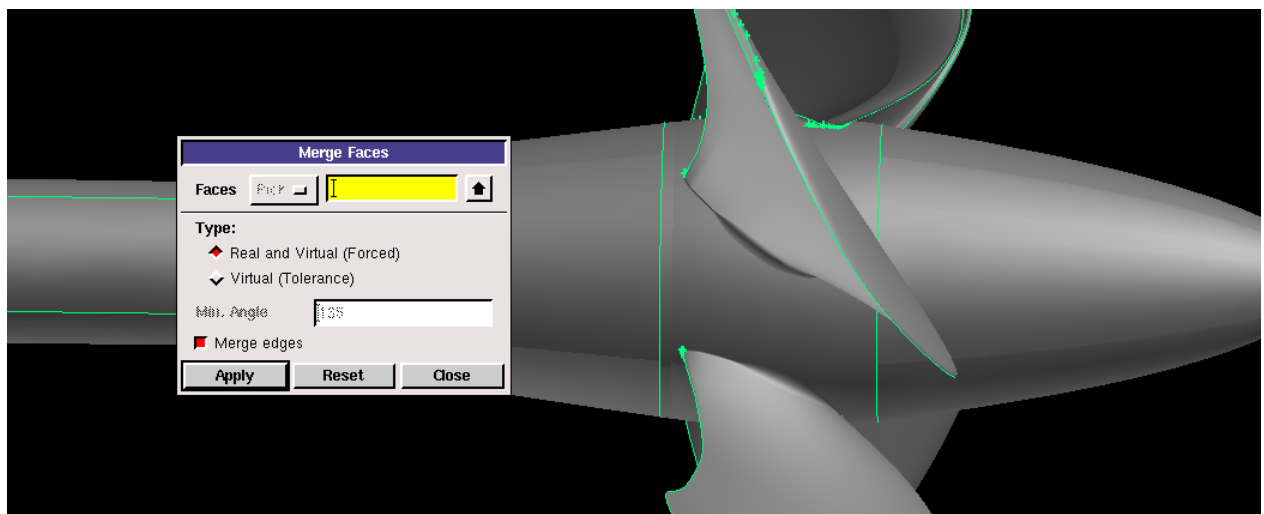


Figura 4-15 Después de Unir Superficies. GMSH.

Por último también se unieron puntos situados en el extremo de las palas (tips), los cuales formaban segmentos muy pequeños (mucho más que el tamaño de celda de la malla) y por tanto dificultaban la creación de una buena malla. Como se puede apreciar en la Figura 4-16 el programa GMSH tiene una opción (Merge Edges) para realizar esta operación. Y se puede apreciar en la Figura 4-17 el resultado de ésta.

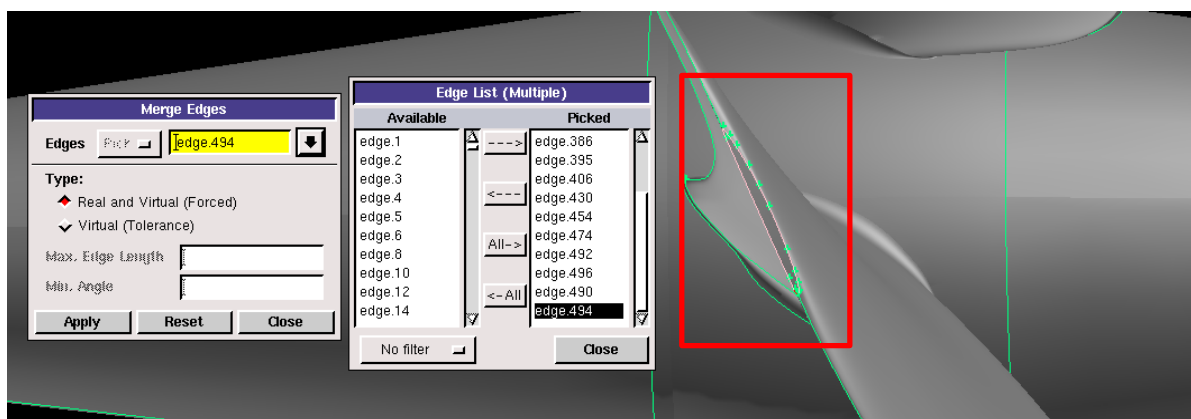


Figura 4-16 Tip de la Pala antes de simplificar. GMSH.

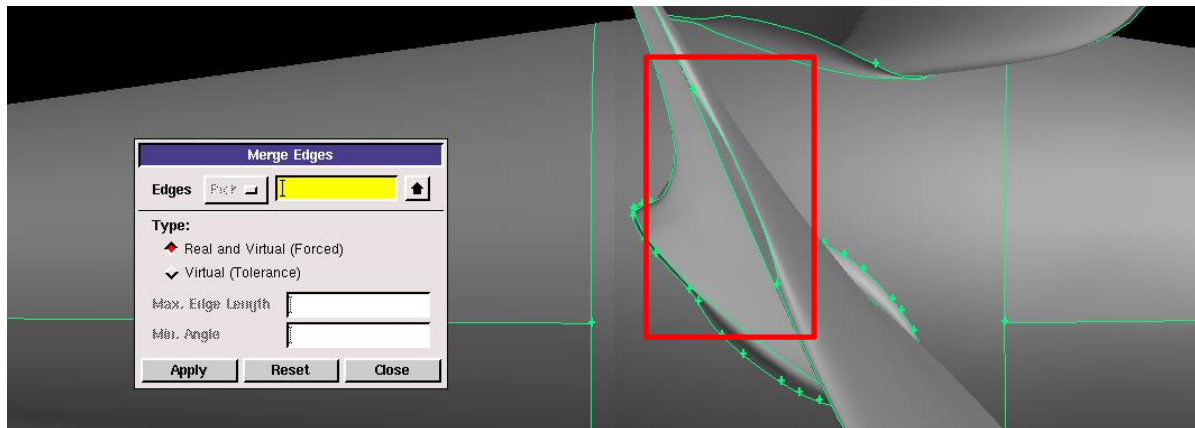


Figura 4-17 Tip de la Pala después de simplificar. GMSH.

Una vez hecho todo esto se procede a trabajar con los volúmenes, se van a nombrar las superficies y dominios, se van a establecer las condiciones de contorno y posteriormente se creará la malla.

4.2.2 Nombre superficies y dominios. Condiciones de Contorno

En este apartado, como se ha mencionado en el apartado anterior, se van a tratar los dominios y las superficies en el GMSH antes del mallado. Es importante hacer esto correctamente, ya que si se hace de manera ordenada después facilitará las operaciones en el solver. Todos los nombres y condiciones de contorno quedarán ligados a la malla que exportaremos al solver.

En primer lugar se le va a dar nombre a los tres volúmenes existentes. Para ello se selecciona el apartado de geometrías (geometry command button) de GMSH y seleccionamos modificar etiqueta (modify volumen color/label). Simplemente se va seleccionando cada volumen y se edita su nombre como se puede ver en la Figura 4-18.

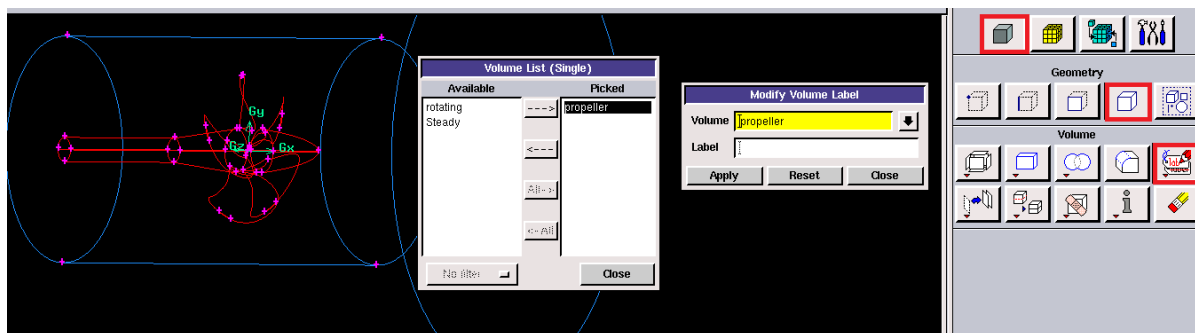


Figura 4-18 Nombre Volúmenes. GMSH.

A continuación se le va a poner nombre a los dominios (rotativo y estacionario) que se designaron para el cálculo. Se va a nombrar al dominio rotativo como “f3d_rotating” y al estacionario “f3d_steady”, además vamos a establecer que por esos dominios va a circular un fluido y no un sólido.

Como podemos ver en la Figura 4-19 existe una opción en el GMSH para especificar tipos de volúmenes (Specify Continuum Types) dentro del apartado del

apartado de “zonas” (zones command button). Con esta herramienta se podrá seleccionar el volumen, ponerle un nombre al dominio y establecer si circula un fluido o si es un sólido.

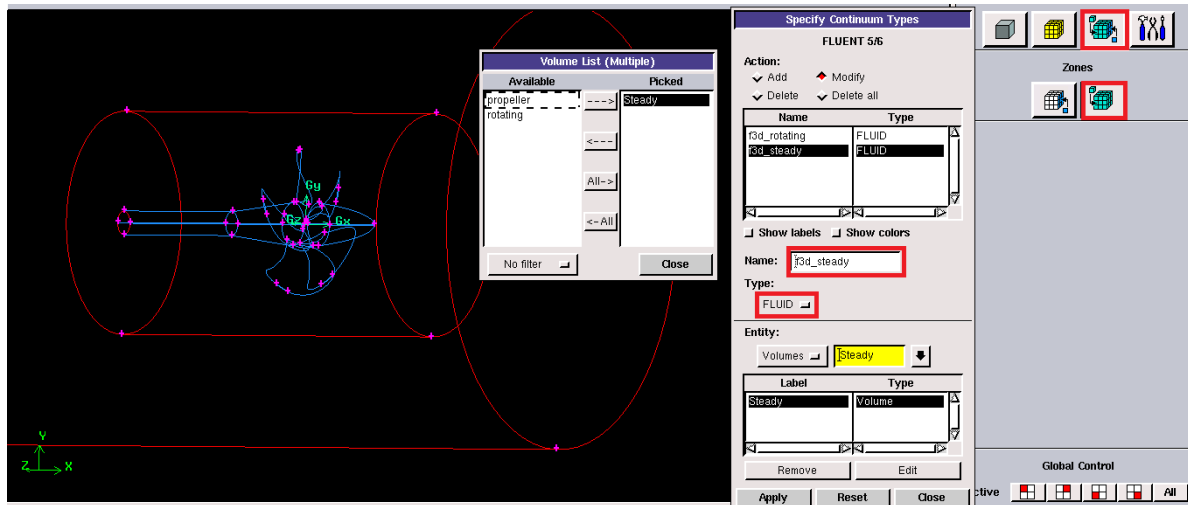


Figura 4-19 Establecer Dominios. GMESH.

Por último se va a proceder a nombrar y establecer las condiciones de contorno de las diferentes superficies existentes en los dominios que se han creado.

Por tanto se procederá sistemáticamente seleccionando las diferentes superficies existentes y se les pondrá nombre y establecerá su condición de contorno. En el caso de las caras de la hélice se agruparán las superficies que formen parte de la misma parte de la hélice o por ejemplo se agruparán todas las caras de presión de las palas de la hélice por un lado y todas las caras de succión por otro. De ésta manera facilitará el posterior trabajo y obtención de resultados en el solver.

Para ello en el mismo apartado de GMESH que antes (zones command button) se selecciona la opción para especificar las condiciones de contorno de superficies (specify boundary types command button).

Se designan 4 tipos de condiciones de contorno:

- Tanto a las caras de la hélice como a la superficie cilíndrica del dominio estacionario se les asigna pared. Esto quiere decir que a través de esas paredes no circula fluido. (WALL) Como se puede ver en la Figura 4-20.

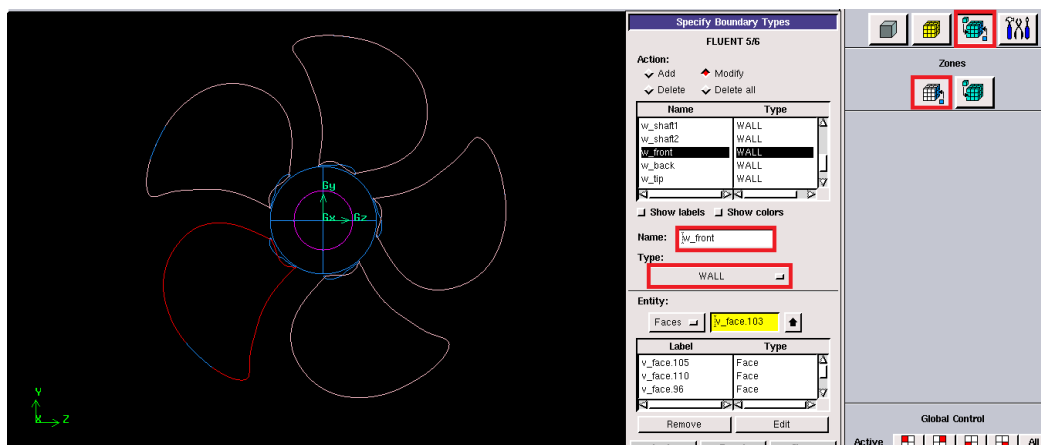


Figura 4-20 Condiciones de contorno, WALL. GMESH.

- A las paredes del cilindro del dominio rotatorio se les asigna la condición de contorno “pared interior” (INTERIOR). Esto es simplemente una separación entre diferentes dominios pero no impide el flujo del fluido. Como se puede ver en Figura 4-21.

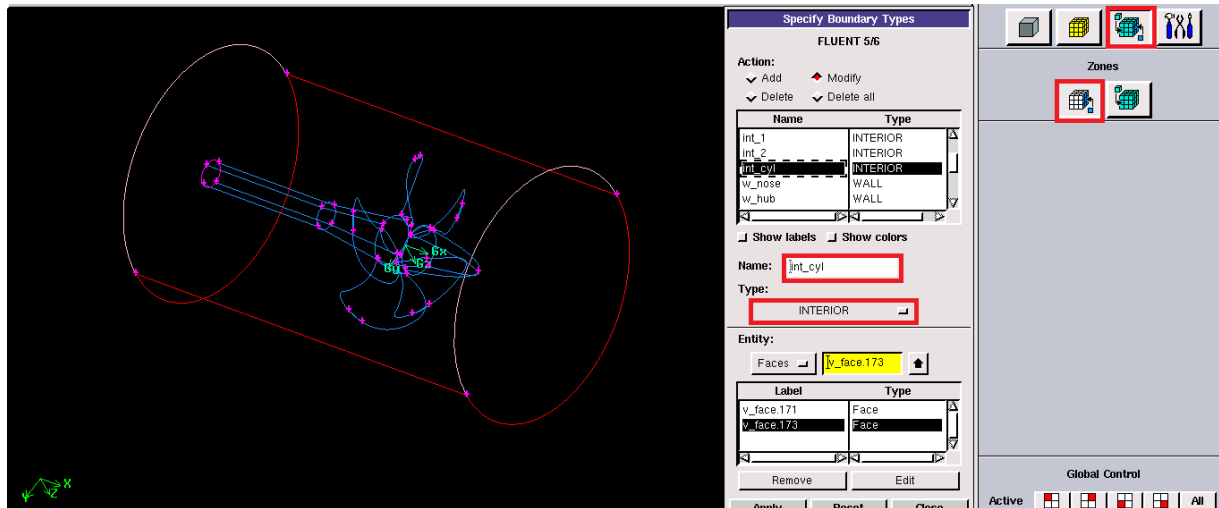


Figura 4-21 Condiciones de contorno, INTERIOR. GMESH.

- A la cara a proa de la hélice del dominio estacionario se le denomina inlet y se le aplican la condición de contorno “VELOCITY-INLET”. Esto permite seleccionar a la velocidad que entra el fluido que se corresponde con la velocidad de avance (V_A) de la hélice. Como se puede ver en Figura 4-22.

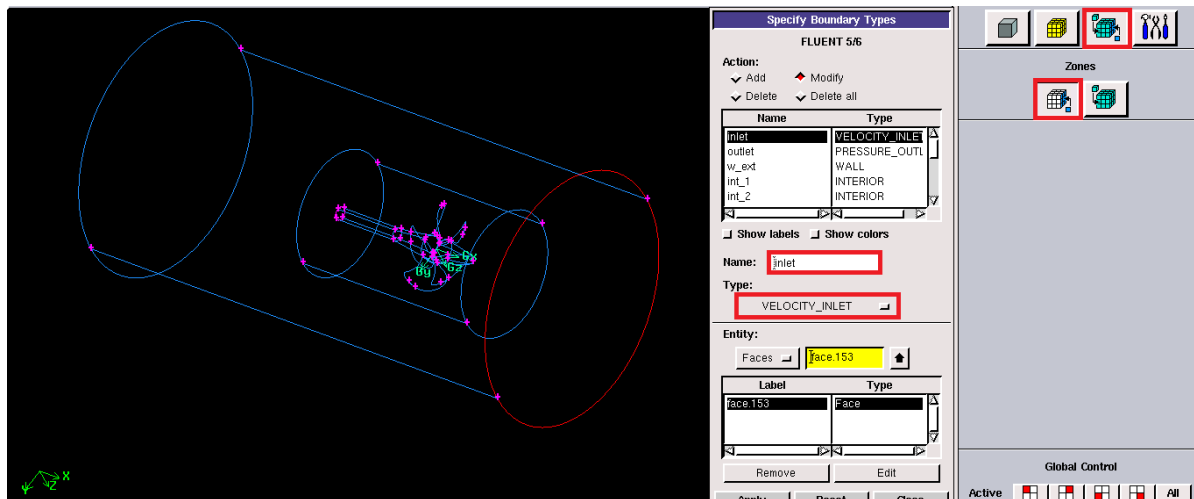


Figura 4-22 Condiciones de contorno, VELOCITY-INLET. GMESH.

- A la cara a popa de la hélice del dominio estacionario se le denomina outlet y se le aplica la condición de contorno “PRESSURE-OUTLET”. Esto fija la presión estática en la salida en cero. Como se puede ver en Figura 4-23.

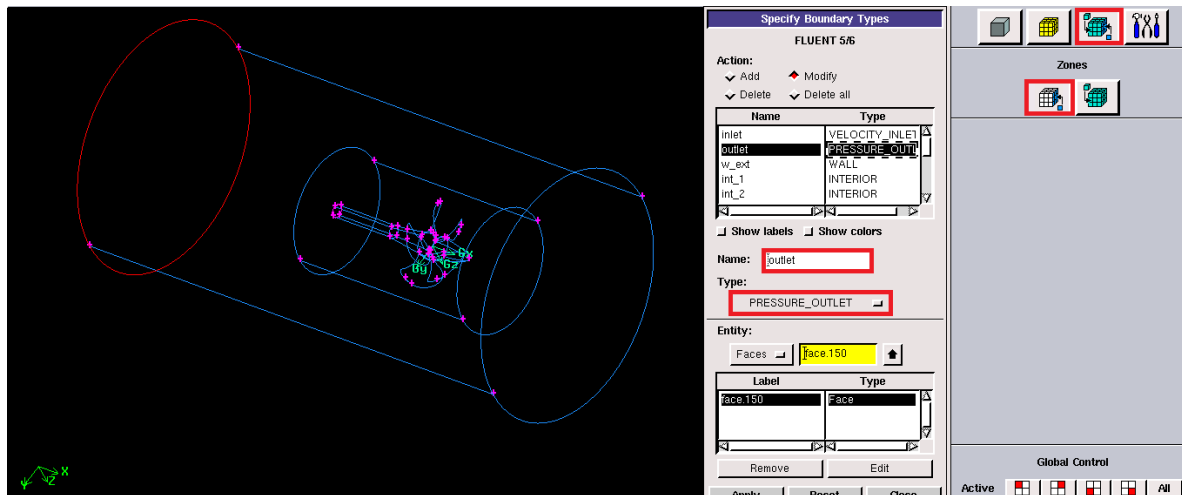


Figura 4-23 Condiciones de contorno, PRESSURE-OUTLET. GMESH.

En la Figura 4-24 se puede ver el resultado en el solver (GSOLVE) donde el programa asigna la identidad de cada superficie y su condición de contorno.

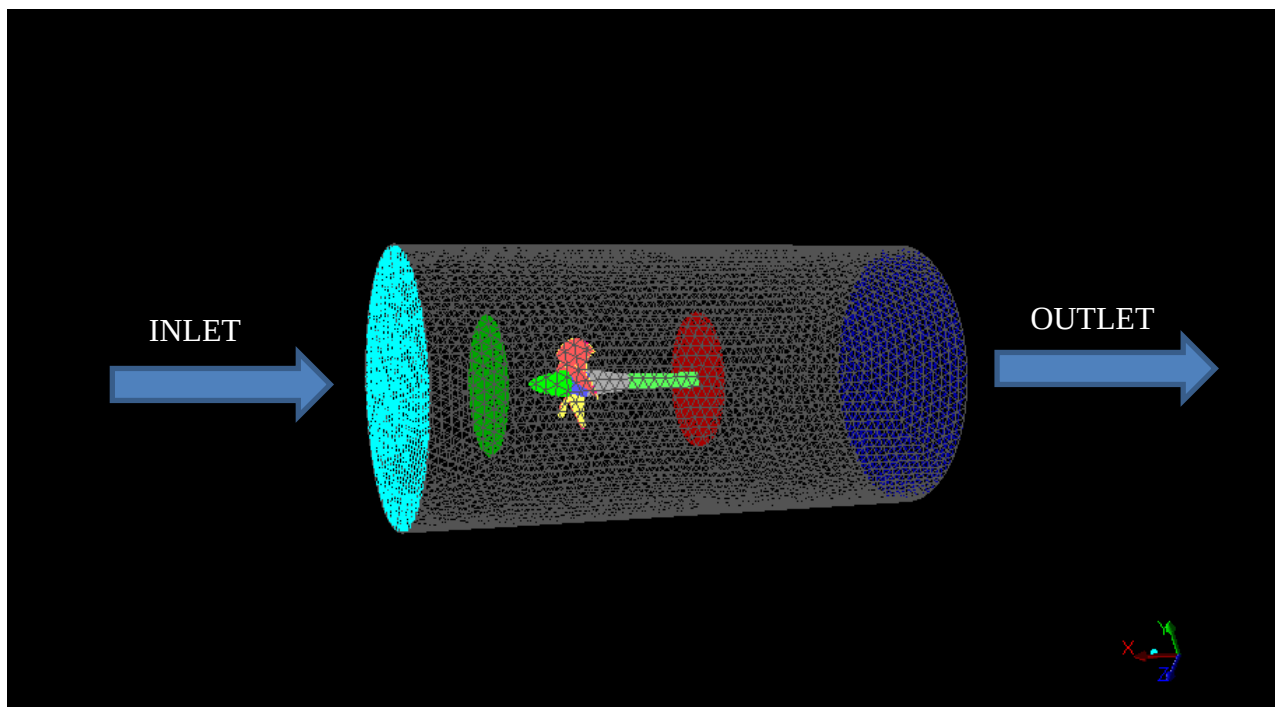


Figura 4-24 Imagen Superficies, Condiciones de contorno. GSOLVE.

4.2.3 Mallado y Control de Calidad de la malla

Una vez hecho todo lo anterior se procede a mallar el dominio computacional. A la hora de realizar cálculos CFD la calidad del mallado es muy importante. El tamaño y el tipo de malla, como ya se comentó anteriormente, influyen directamente en el coste de memoria, tiempo de computación y el error en los resultados obtenidos. Por lo tanto a menor tamaño de malla se tendrá un mayor coste de memoria y tiempo de computación y un menor error.

Para la realización de este proyecto se optó por una malla de un tamaño relativamente grande comparado con el tamaño de malla que suelen usar las empresas que se dedican a hacer cálculos CFD de este tipo. Se ha usado este tamaño de malla para reducir tiempos de computación y debido a que el equipo con el que se ha realizado el cálculo solo disponía de 4Gb de RAM.

Para obtener una convergencia estable en la solución y una mejor aproximación del fluido alrededor de la hélice la malla debe ser más fina en las partes próximas a la hélice y concretamente alrededor de las palas ya que en esas zonas es donde va a existir un mayor gradiente en los valores que se quiere medir.

Para el mallado del dominio primero se malla la superficie de la hélice, a partir de esta malla superficial se procede al mallado del dominio rotativo y posteriormente, a partir de este, se procede a mallar el dominio estacionario.

Para el mallado de la superficie de la hélice se utiliza una malla triangular de 4 mm de tamaño, como se puede apreciar en la Figura 4-25.

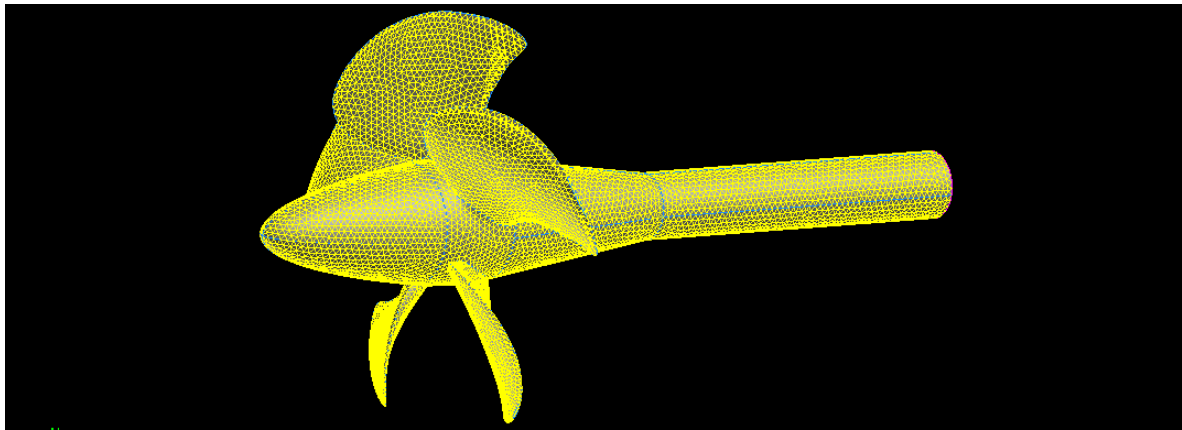


Figura 4-25 Mallado Superficie de la Hélice. GMESH.

Para el mallado del volumen del dominio rotativo se ha creado una malla de estructura de celda tetraédrica a partir de la primera malla superficial. Ésta tiene un coeficiente de crecimiento de 1.2 y termina con un tamaño de malla de 20mm, como se puede apreciar en la Figura 4-26.

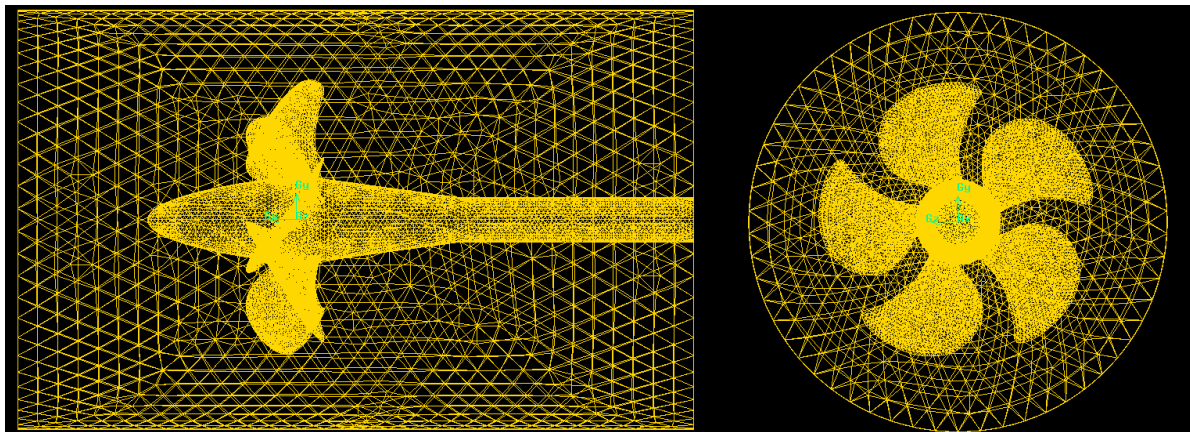


Figura 4-26 Malla dominio Rotativo. GMESH.

Para el mallado del volumen del dominio estacionario se procede prácticamente de la misma forma que el dominio rotativo. Se crea una malla tetraédrica a partir de la malla anterior. Esta tiene un coeficiente de crecimiento de 1.2 y termina con un tamaño de malla de 30mm. En la Figura 4-27 se puede el mallado completo.

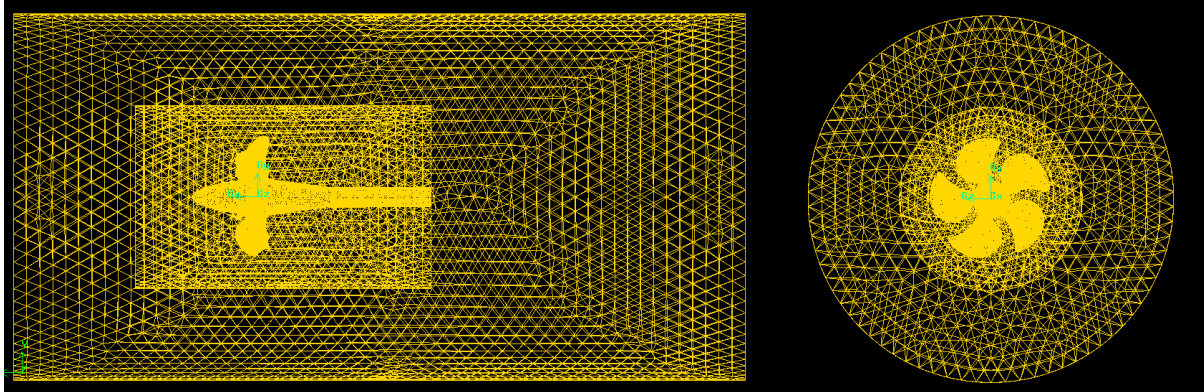


Figura 4-27 Malla Dominio Estacionario. GMESH.

En la Tabla 3 se puede observar información sobre la malla, número de nodos y elementos de algunas partes importantes de la malla.

Nombre	Tipo	Nodos	Nº Elementos.
Inlet/outlet	Triangular	606	1.132
Cara presión 1 Pala	Triangular	622	1.152
Dominio Rotativo	Tetraédrica	39.818	194.062
Dominio Estacionario	Tetraédrica	35.738	186.896
Malla completa	Tetraédrica	72.109	380.958

Tabla 3 Análisis Número elementos Mallado.

Además el programa GMESH tiene una herramienta que nos permite analizar gráficamente la malla gracias a un código de colores. Entrando en “examinar malla” (Examine Mesh) podemos realizar cortes en el mallado que nos permiten analizar la malla con mayor facilidad como se muestra en la Figura 4-28.

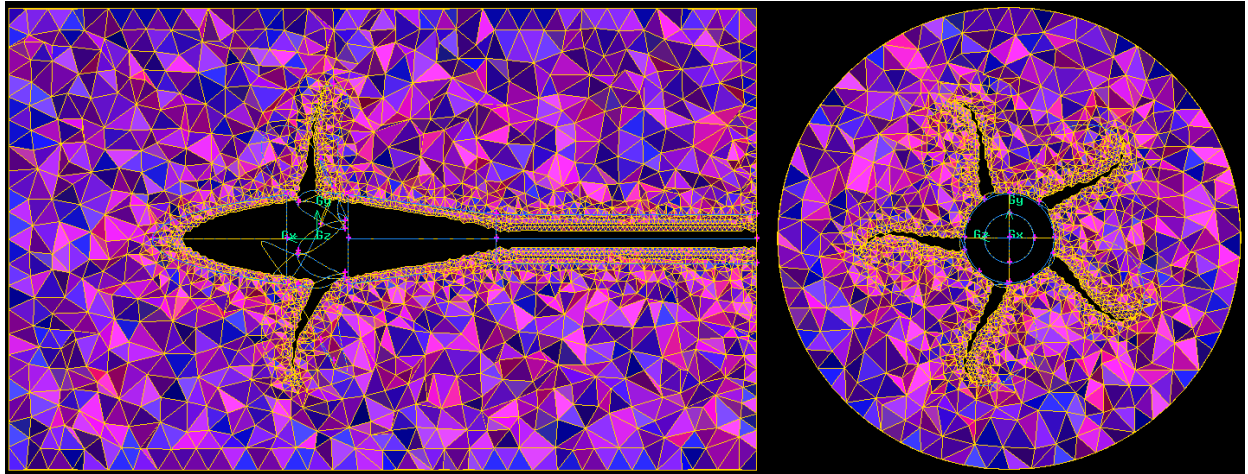


Figura 4-28 Análisis de Malla, dominio rotativo. GMESH.

Una vez se tiene la malla se guarda en formato “Mesh” (.msh) para importarla al programa solver, que en este proyecto se utiliza el programa GSOLVE.

4.3 SOLVER

En este apartado se van a realizar los cálculos sobre la hélice. Para ello en primer lugar se configura la simulación (escala, modelo, materiales, dominios, condiciones de contorno, etc.) y a continuación se procede a la simulación y la obtención de resultados.

4.3.1 Configuración

Como se acaba de mencionar en este apartado vamos a ir paso a paso configurando lo necesario para poder realizar la simulación de la hélice en cada uno de los puntos de cálculo.

- Una vez importada la malla al programa GSOLVE, el programa lee la malla con unas **unidades** predeterminadas, en este caso metros (m). Sin embargo la malla y la estructura fueron definidas en mm, por tanto hay que cambiar esa configuración. Como podemos observar en la Figura 4-29 seleccionando la opción “escala” (scale), en el apartado “general” permite modificar esto.

Además en la opción “display” se puede seleccionar que se quiere mostrar del dominio y que no, color, etc. Al haber agrupado las diferentes superficies y haberles dado nombre en el programa GMESH, como ya se hizo y se explicó en el apartado “Nombre superficies y dominios. Condiciones de Contorno”, ahora el programa GSOLVE las reconoce y es más fácil operar con éstas.

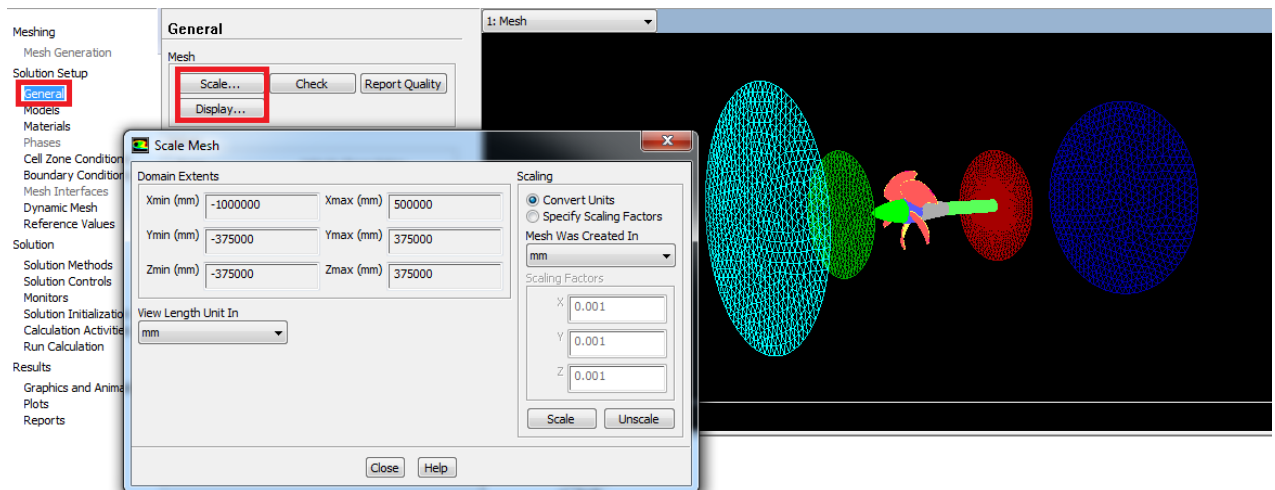


Figura 4-29 Ajuste Escala Malla. GSOLVE.

- Otra operación que hay que realizar es la de **reordenado del dominio**. Para ello, como se puede observar en la Figura 4-30, entramos en el apartado “malla” (mesh) y en “reorder” seleccionamos dominio (domain). Repetiremos esto hasta que la reducción del ancho de banda sea uno. (bandwidth reduction = 1). Haciendo esto se consigue revisar cada dominio de control del dominio con el fin de evitar fallos de cálculo.
- Entrando en el siguiente apartado encontramos el apartado **modelo** (models). En este apartado se encuentran los modelos para múltiples tipos de dominio y dependiendo de lo que se quiera modelar, como por ejemplo energía, radiación, intercambio de calor, viscosidad, etc.

En el caso de este proyecto el flujo es turbulento, cuando esto ocurre en las ecuaciones aparecen una serie de términos adicionales. La solución para estos términos es seleccionar un modelo de turbulencia. En el caso de la dinámica de fluidos computacional, aplicada a simulaciones de flujo a través de elementos rotativos y en conductos de sección circular, los más utilizados son los modelos K- ϵ y K- ω . Donde K, ϵ y ω son variables de dos nuevas ecuaciones. K es la energía cinética turbulenta, ϵ es la disipación de la turbulencia y ω es la disipación específica.

Para la realización de este proyecto se va a utilizar el modelo turbulento K- ϵ , ya que es el que mejor se adapta a las características del cálculo. En la Figura 4-31 se ve como seleccionar el modelo.

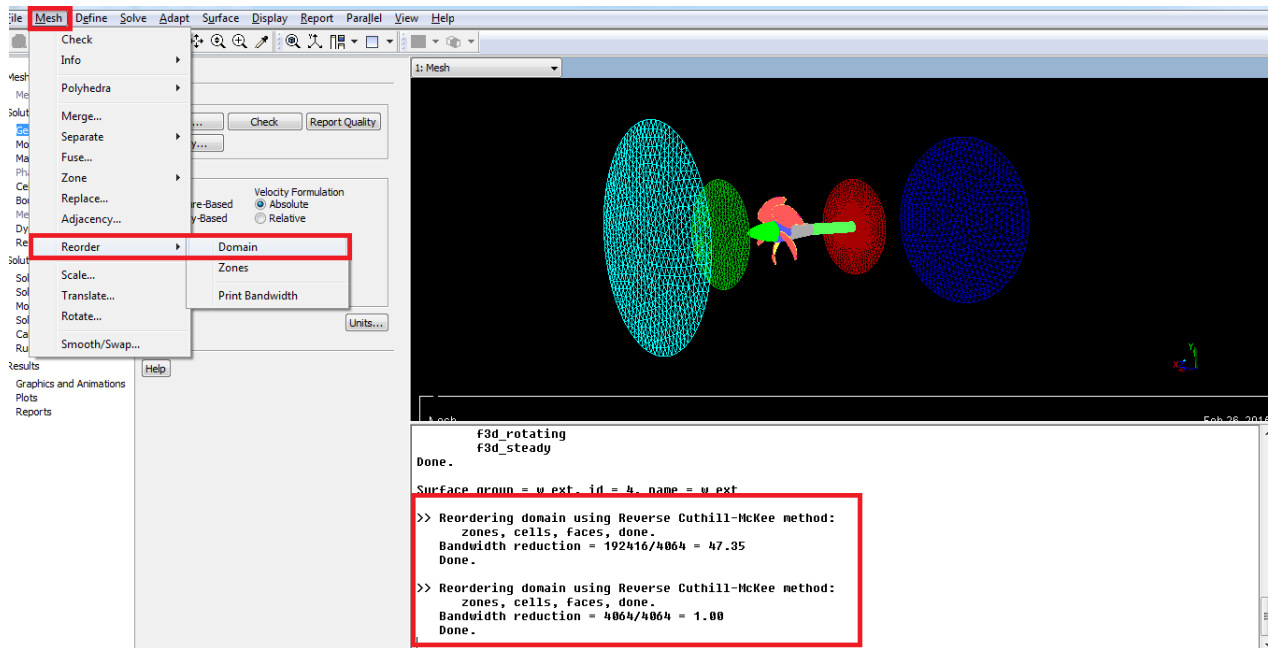


Figura 4-30 Reordenamiento del Dominio. GSOLVE.

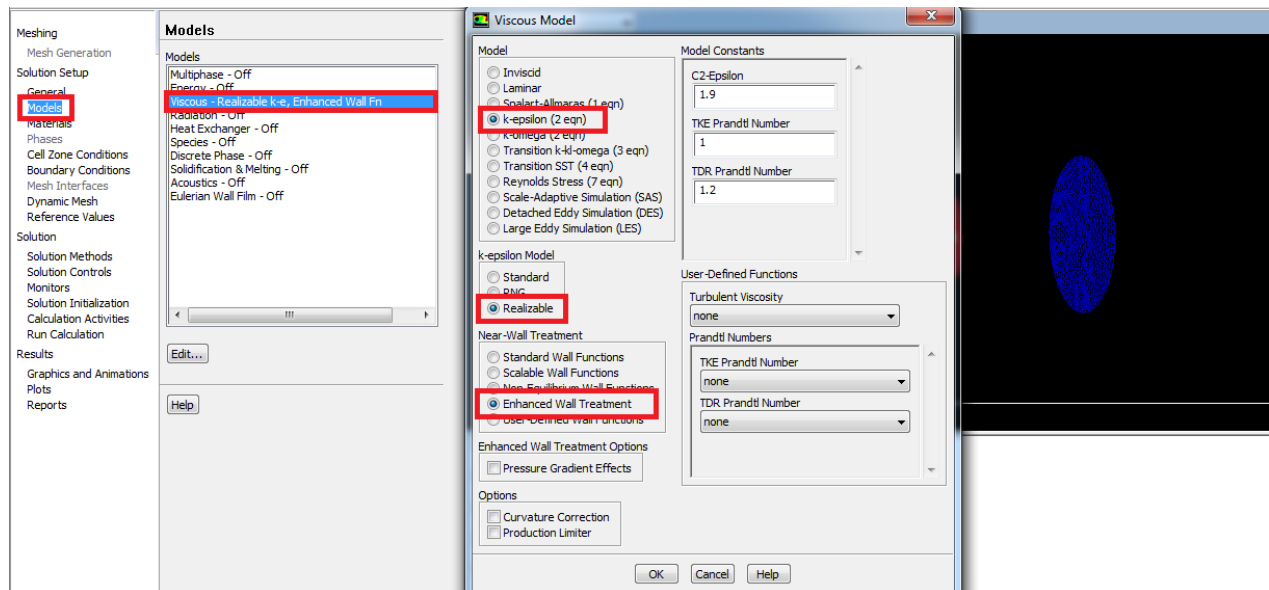


Figura 4-31 Selección Modelo Turbulento k- ϵ . GSOLVE.

- En el apartado de “**materiales**” (materials) podemos seleccionar aquellos materiales que vamos a utilizar en nuestra simulación. En nuestro caso, el fluido será agua y la hélice estará formada por un sólido, por ejemplo aluminio. Figura 4-32.

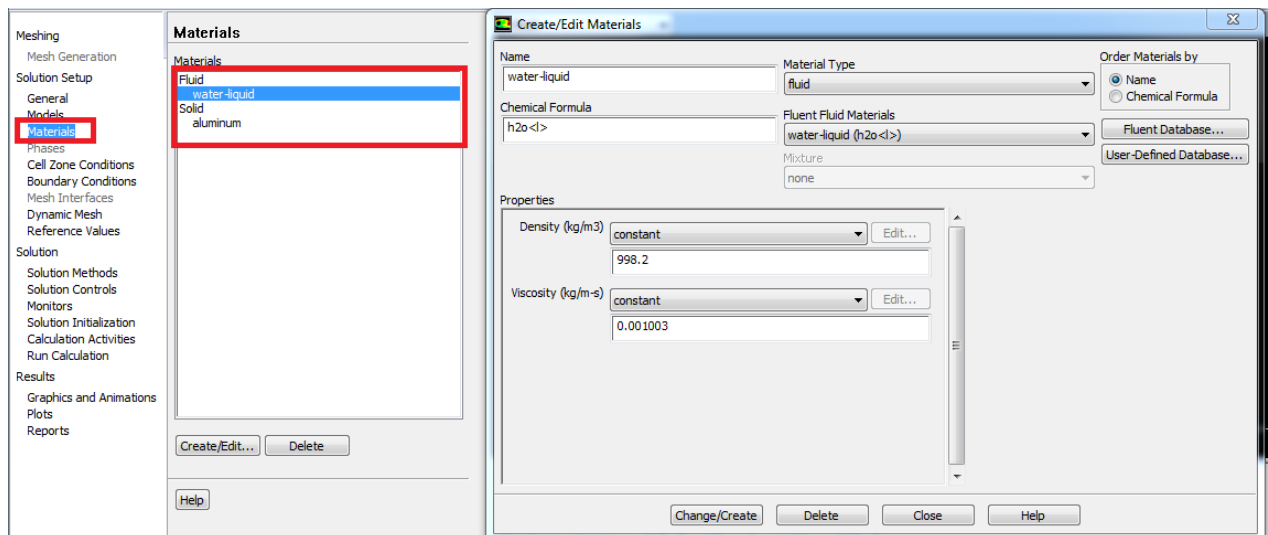


Figura 4-32 Selección de Materiales. GSOLVE.

- En el apartado de “Cell Zone Conditions” se configuran los dominios que ya hemos definido anteriormente y sobre los que se va a simular. En este apartado se configurará el dominio con un MRF, como ya se explicó en el apartado Dominios. Además también se seleccionará el material que va a circular por el dominio, en este caso agua.

En este apartado del programa GSOLVE en primer lugar encontraremos los dos dominios que hemos creado, “f3d_rotating” y “f3d_steady”.

En primer lugar entramos en el dominio rotativo. Aquí tendremos que configurar el movimiento del dominio. El dominio rotativo debe girar solidario al eje de rotación de la hélice y a las mismas revoluciones por minuto (rpm). Para ello, como vemos en la Figura 4-33, se selecciona la opción “frame motion”, la cual nos permite configurar la velocidad de rotación del dominio y el eje de giro.

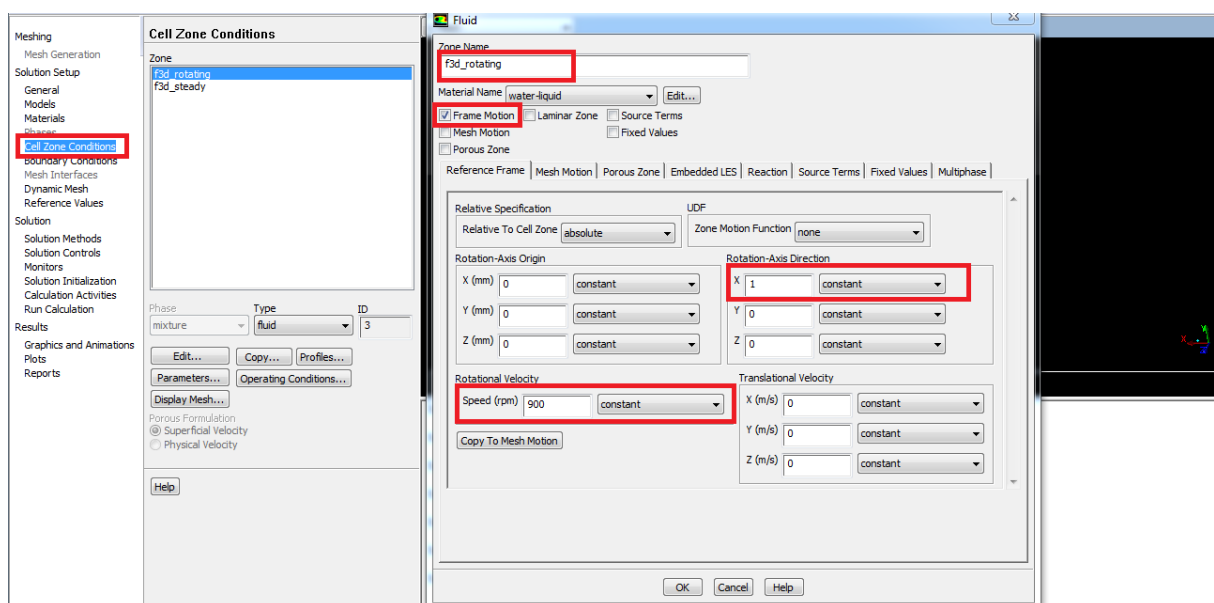


Figura 4-33 Configuración Dominio Rotativo. GSOLVE.

Sin embargo para el dominio estacionario, al ser un dominio fijo con respecto al sistema de referencia de la hélice no hay que asociarle ningún movimiento como se puede ver la configuración en la Figura 4-34.

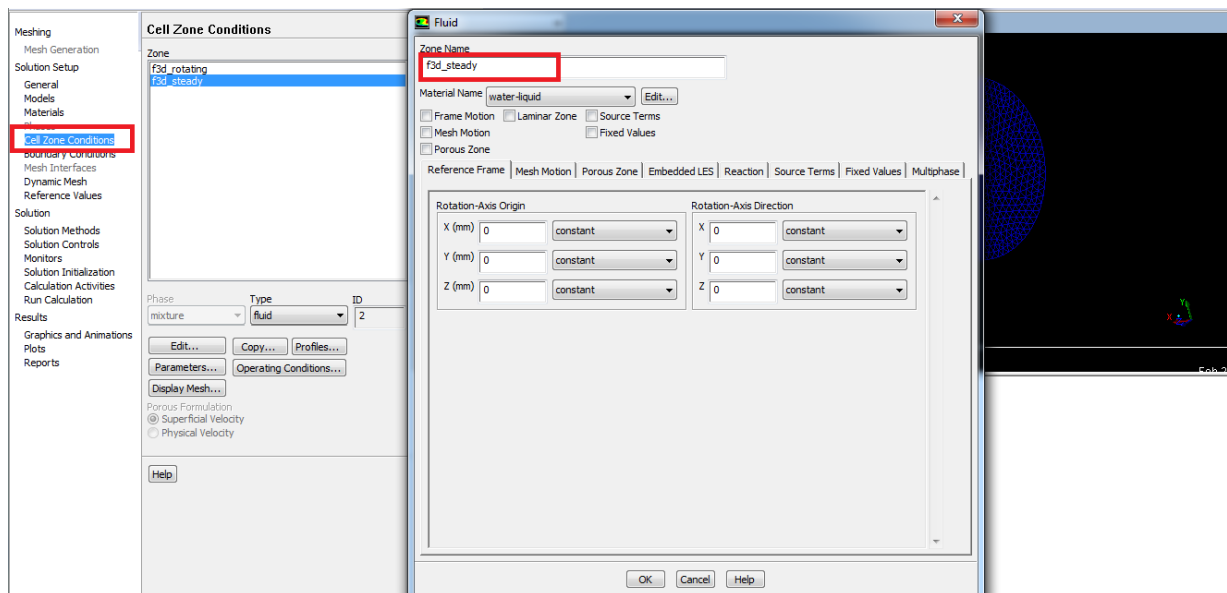


Figura 4-34 Configuración Dominio Estacionario. GSOLVE.

- Por ultimo entrando en el apartado del programa GSOLVE en el apartado condiciones de contorno “boundary conditions” se va a proceder a establecer las condiciones de contorno de las de las diferentes superficies.

En este punto podemos ver la ventaja que tiene agrupar las superficies de la hélice e ir especificando las condiciones de contorno de cada una de ellas en el programa GMESH, explicado en “Nombre superficies y dominios. Condiciones de Contorno”. Por tanto al entrar en el apartado del programa GSOLVE de condiciones de contorno vamos a encontrar las diferentes superficies con su nombre y con su condición de contorno ya designada (WALL, INTERIOR, VELOCITY-INLET, PRESSURE OUTLET).

Lo único que nos quedaría por hacer es modificar la condición de Velocity-Inlet de la superficie “inlet”, en la cual vamos a especificar la velocidad de entrada de fluido en el dominio que se corresponde con la velocidad de avance (V_a) de la hélice. .

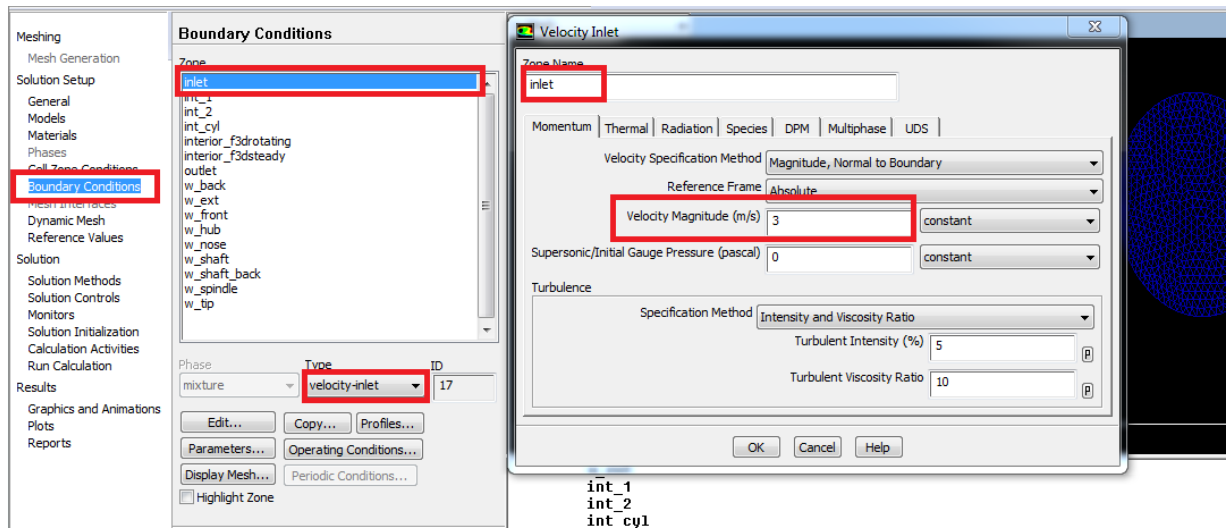


Figura 4-35 Configuración de la Inlet. GSOLVE.

4.3.2 Simulación

Una vez configurada la simulación sólo queda simular para cada una de las velocidades que se van a estudiar, seleccionándola en la condición de contorno de la inlet. Para ello, entrando en el apartado “realizar cálculo” (run calculation), seleccionamos el número de iteraciones. Para esta malla la simulación converge generalmente entre 100 y 200 iteraciones. En la Figura 4-36 se puede ver la simulación para la velocidad de 3 m/s.

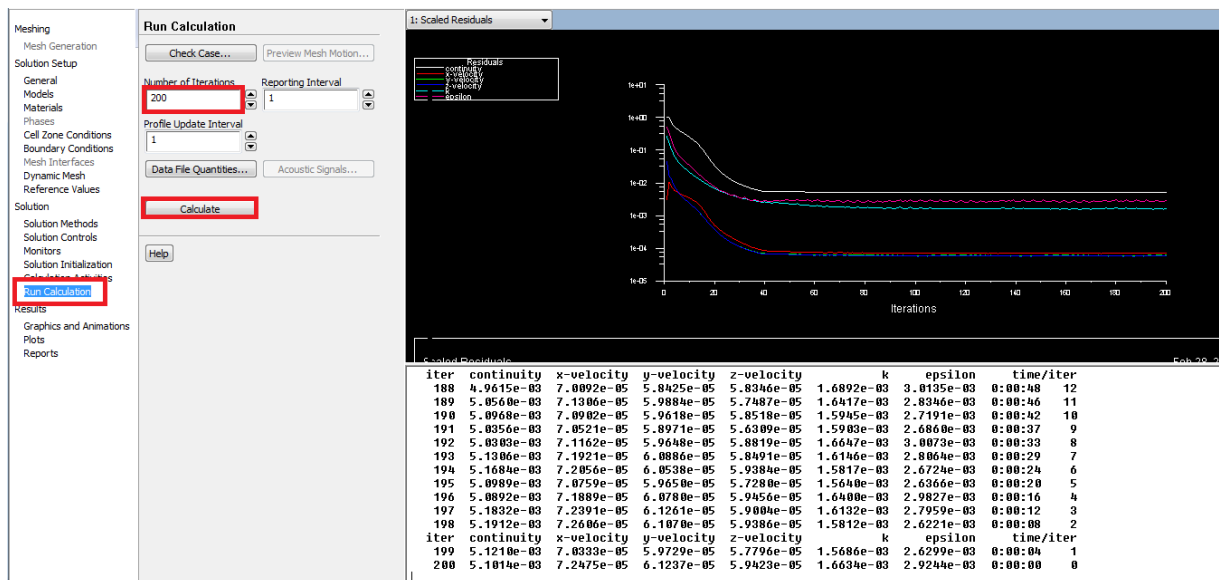


Figura 4-36 Simulación (3m/s). GSOLVE.

Para la realización de este proyecto se ha considerado convergencia cuando el valor entre iteraciones era menor de 0.001. Además el programa GSOLVE durante la simulación proporciona una serie de representaciones gráficas que permiten saber si se alcanza la solución numérica.

Una vez converge la simulación se extraen los valores de fuerza de empuje y momento para cada uno de los puntos de trabajo de la hélice (cada velocidad de avance).

Para ello como se puede apreciar en Figura 4-37 es necesario entrar en el apartado “informes” (reports) y seleccionar “fuerzas” (forces). Entonces aparecerá una ventana donde se seleccionan las superficies que queremos que participen en la fuerza o momento que se quiere medir. Para este proyecto se quiere medir la fuerza y el par que produce la hélice aislándola del núcleo (hub) y el eje. Para ello se selecciona la cara de presión (back face), la cara de succión (front face) y los extremos de las palas (tips). Además, como el programa da un valor numérico, también es necesario seleccionar la componente de la dirección de la fuerza o el momento, en este caso eje “x”.

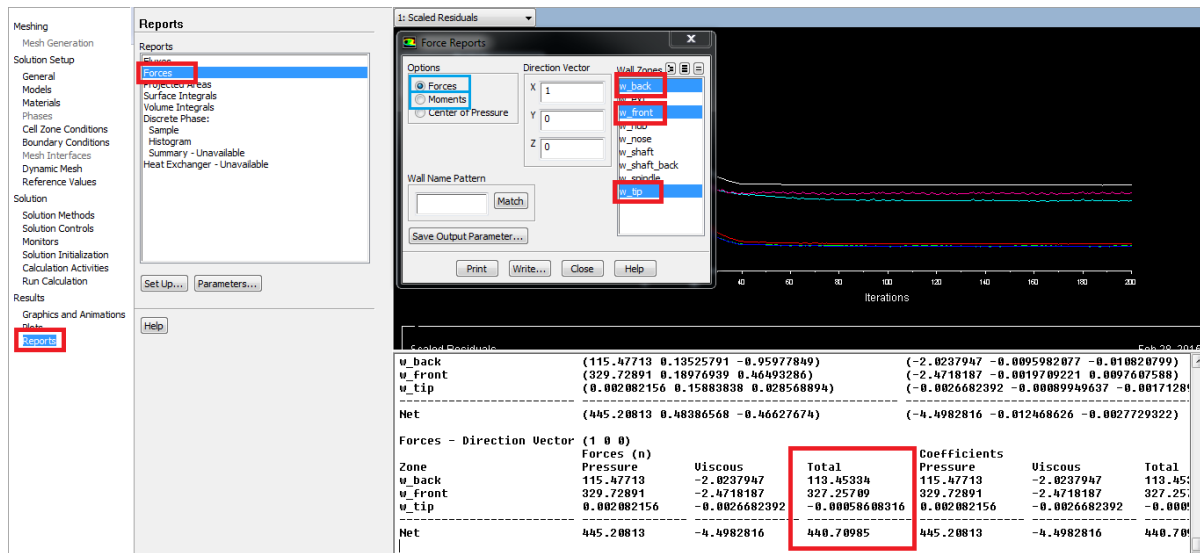


Figura 4-37 Cálculo de una Fuerza. GSOLVE.

Por tanto, para obtener los resultados se realiza esta operación sistemáticamente para cada punto de funcionamiento de la hélice (cada velocidad de avance) y registrando los valores de empuje y par.

Como resultado se muestra a continuación la Tabla 4 en la cual se representan los resultados obtenidos tras realizar la simulación para cada punto de trabajo de la hélice. Además en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo experimental para los mismos puntos de trabajo de la hélice, incluidos en el informe de la referencia [8].

No.	V	n	T	Q
	[m/s]	[rpm]	[N]	[Nm]
1	0.50	15.00	676.73	38.70
2	1.00	15.00	646.10	37.00
3	1.50	15.00	602.83	34.68
4	2.00	15.00	552.00	32.12
5	2.50	15.00	498.63	29.56
6	3.00	15.00	440.71	26.82
7	3.50	15.00	379.23	23.87
8	4.00	15.00	315.14	20.73
9	4.50	15.00	250.98	17.51
10	5.00	15.00	186.55	14.18
11	5.50	15.00	119.38	10.59
12	6.00	15.00	41.93	6.34
13	6.30	15.00	-10.59	3.41

Tabla 4 Resultados Simulación. Empuje y Par.

No.	V	n	T	Q
	[m/s]	[rpm]	[N]	[Nm]
1	0.50	14.98	792.62	42.77
2	1.00	14.98	727.63	39.19
3	1.50	14.98	653.97	35.39
4	2.00	14.98	583.92	32.07
5	2.50	14.98	517.02	29.01
6	3.00	15.03	450.84	26.07
7	3.50	15.02	385.70	23.10
8	4.00	14.98	318.74	19.91
9	4.50	14.97	255.63	16.79
10	5.00	15.03	196.45	13.88
11	5.50	15.08	138.95	10.97
12	6.00	15.03	55.60	6.42
13	6.30	15.03	4.17	3.55

Tabla 5 Resultados Ensayo experimental. Empuje y Par.

4.4 POST-PROCESADO

En la parte de post-procesado se analizan los resultados de la simulación. Los primeros pasos en esta tarea deben ir dirigidos a realizar comprobaciones varias que permitan descartar una entrada de datos errónea durante la preparación de la simulación. También es un buen momento para verificar si se satisfacen los criterios mínimos exigidos por algunos de los submodelos empleados. En el caso de disponer de resultados experimentales puede realizarse una comprobación de alguna variable de control.

Una vez validada la simulación a través de la comparación de resultados se puede proceder al análisis hidrodinámico del flujo a través de la hélice. Las herramientas disponibles dentro de un programa CFD para realizar la salida y visualización de los resultados obtenidos son muy variadas. Dependiendo del fin perseguido con la simulación habrá una forma más adecuada de presentar los resultados. En este TFG la salida de resultados consiste en comparar las variables de funcionamiento globales de la simulación con las medidas experimentales en el canal hidrodinámico. Sin embargo como también se pretende mostrar aspectos de la hidrodinámica básica del funcionamiento de la hélice se van a mostrar una galería de imágenes donde se aprecien los contornos de presión, mapas de vectores y líneas de corriente.

Se elige el punto de funcionamiento de velocidad $V_a = 3$ m/s ($J=0.8$) ya que es el punto de mejor rendimiento de propulsión y es más fácil analizar el flujo.

En la Figura 4-38 y la Figura 4-39 se puede ver un mapa de vectores de la velocidad relativa del fluido alrededor del álabes de la hélice. Donde, como se trató en el apartado de **Hidrodinámica Básica**, se observa el efecto que se produce cuando el fluido pasa alrededor de la pala de la hélice. Éste es que la velocidad relativa es mayor en la cara de menor presión y menor en la cara de mayor presión. Debido al principio de Bernoulli habrá un incremento de presión en la cara de presión y un decremento de presión en la cara de succión.

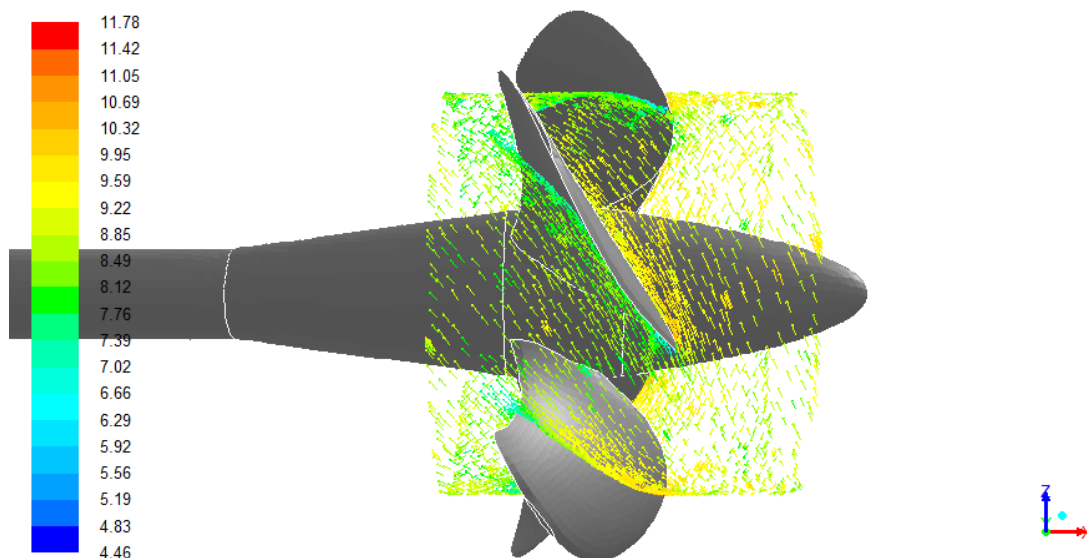


Figura 4-38 Vectores, Velocidad relativa 1

Además se puede apreciar el ángulo de ataque de la pala de la hélice para esa velocidad. El ángulo de ataque de la pala de la hélice depende de la velocidad de avance del buque y de la velocidad de rotación de la hélice. Para un ángulo de ataque mayor que cero se genera una fuerza de sustentación normal a la superficie del álabes producida por el flujo de agua y a su vez una fuerza de rozamiento en la dirección de la velocidad relativa

del agua. Si el ángulo de ataque fuera igual a cero entonces la pala no experimentaría ninguna fuerza de sustentación y la hélice no proporcionaría empuje al buque.

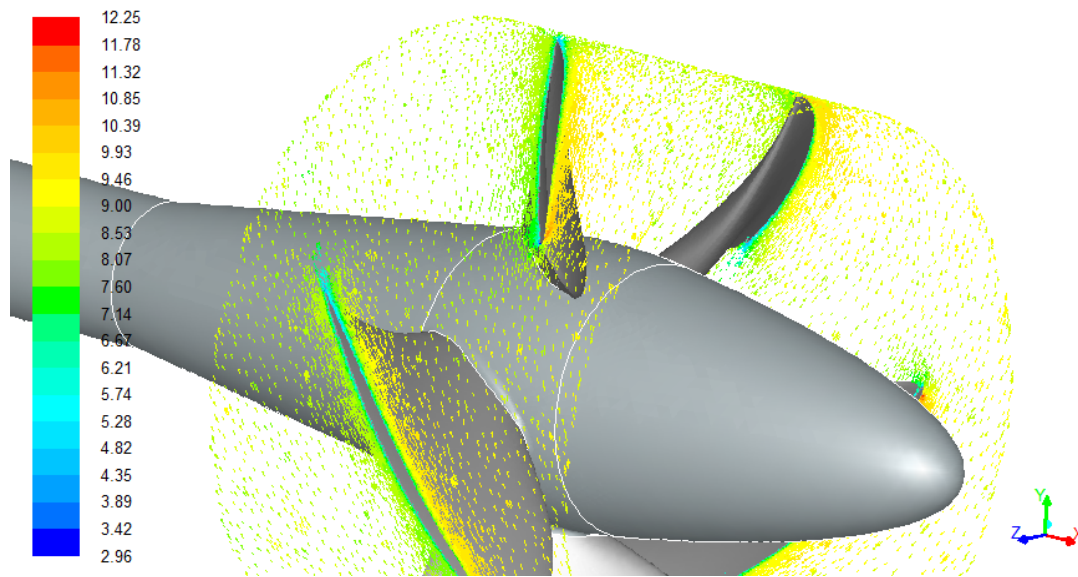


Figura 4-39 Vectores, Velocidad Relativa 2

En la Figura 4-40 y la se puede ver un mapa de vectores que muestra la velocidad absoluta del fluido alrededor de la hélice. En ella se observa como el fluido a proa de la hélice se acerca a ella con una velocidad axial y con módulo igual a la velocidad de avance. Sin embargo una vez que pasa la influencia de las palas de la hélice experimenta un aumento de velocidad absoluta. Por tanto la hélice altera la cantidad de movimiento del fluido para obtener empuje.

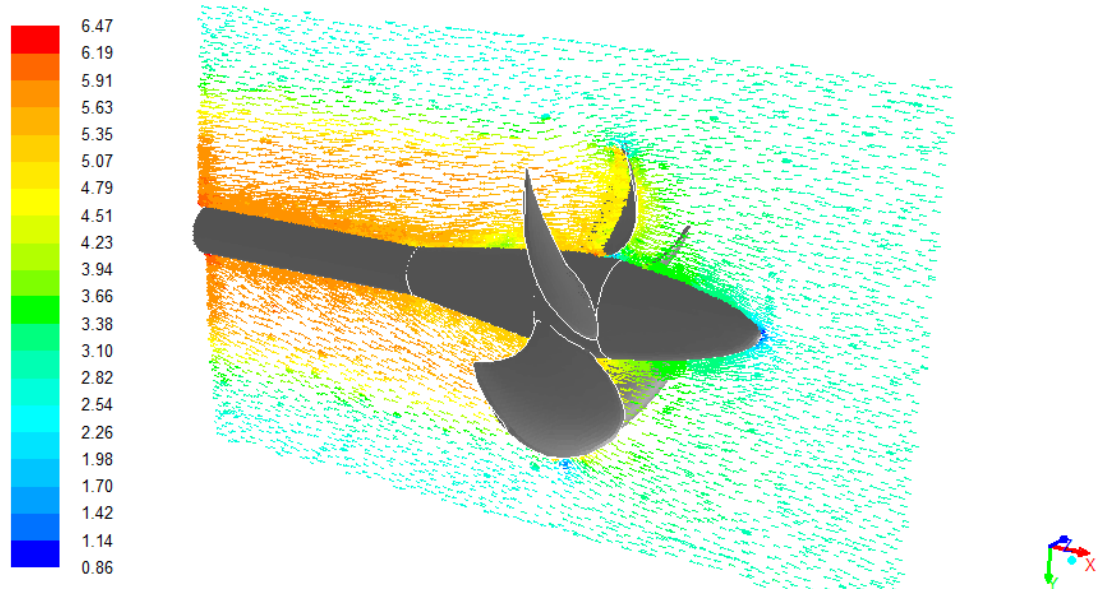


Figura 4-40 Vectores, Velocidad absoluta 1

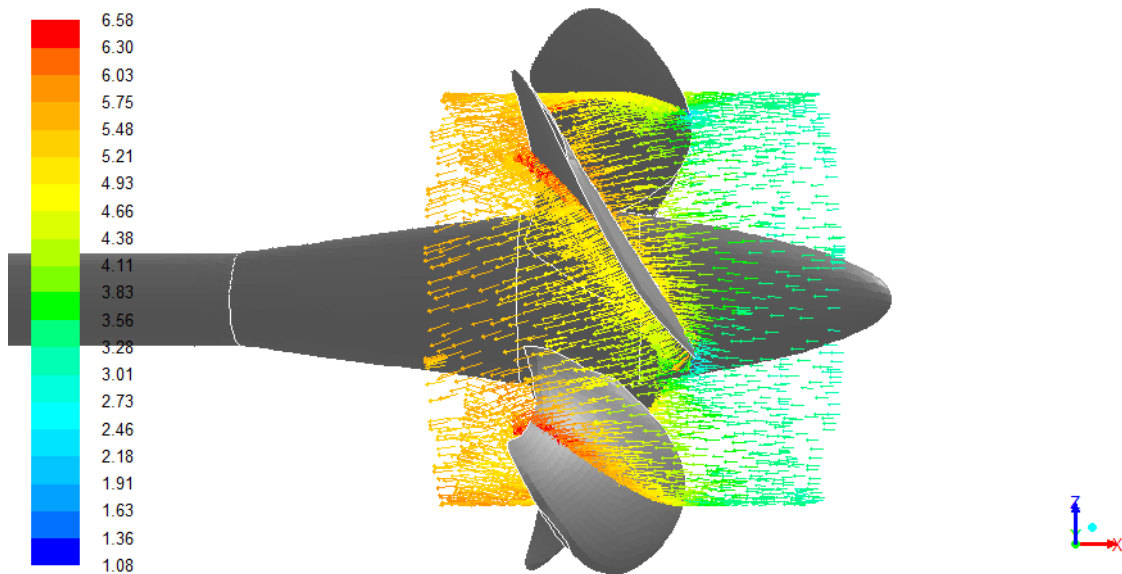


Figura 4-41 Vectores, Velocidad Absoluta 2

Por último en la Figura 4-42, la Figura 4-43 y la Figura 4-44 se pueden ver diferentes contornos de presión de la hélice. Donde, en la cara de presión existe una presión positiva y en la cara de succión existe una presión negativa.

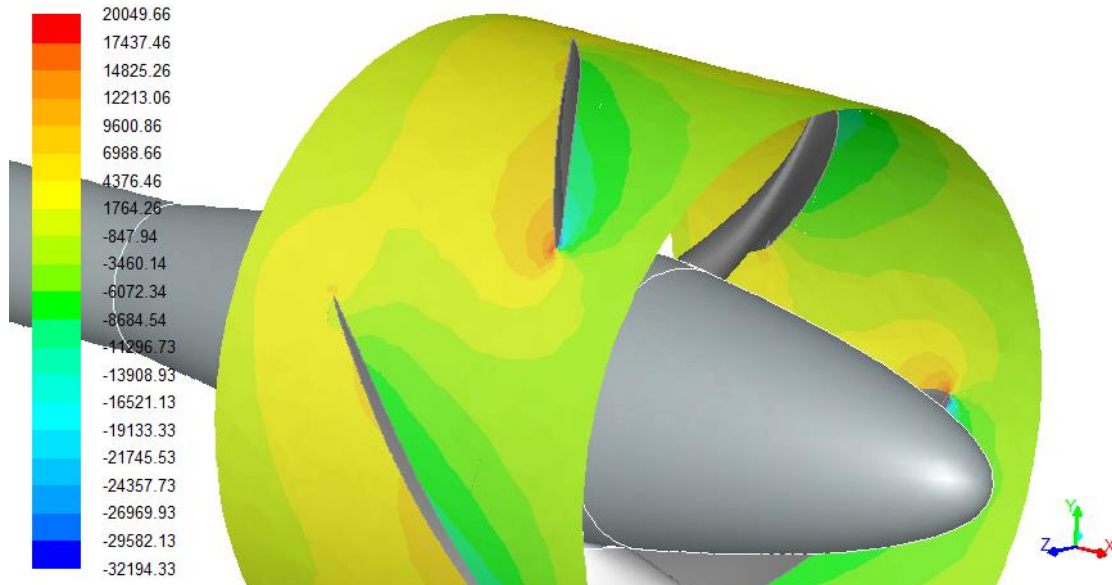


Figura 4-42 Presión 1.

Destacar que en la cara de presión existe un punto de caída entre la mita de la pala y el borde de ataque de la pala. Si esta caída de presión es demasiado alta en relación con la presión ambiente en un fluido como el agua aparecerán burbujas de vapor de agua. Estas burbujas van creciendo hasta el borde de desprendimiento y colapsan cuando entran en una zona con mayor presión. A este efecto se le conoce como cavitación y es mala para el ruido y el rendimiento de la hélice.

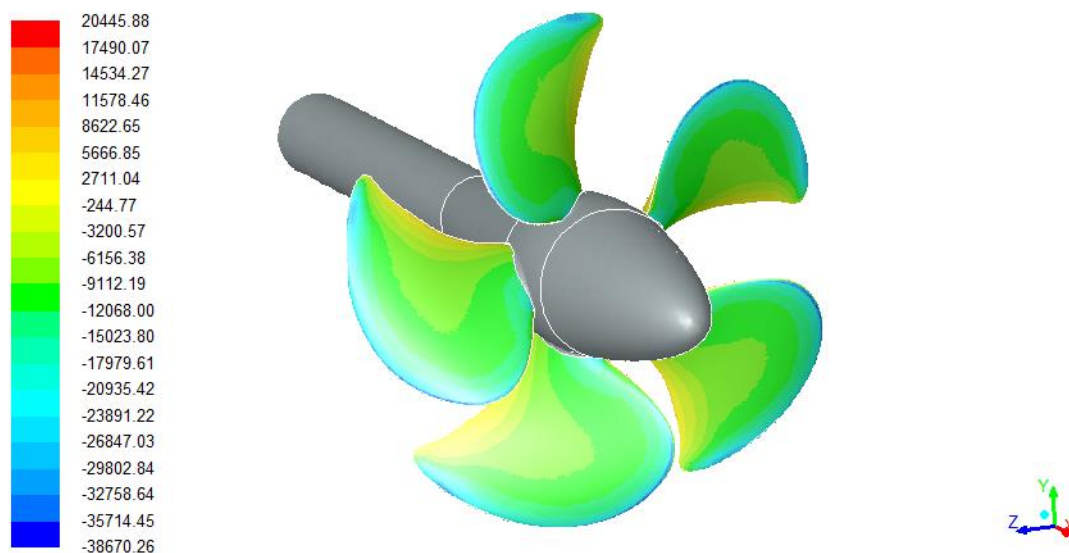


Figura 4-43 Presión 2.

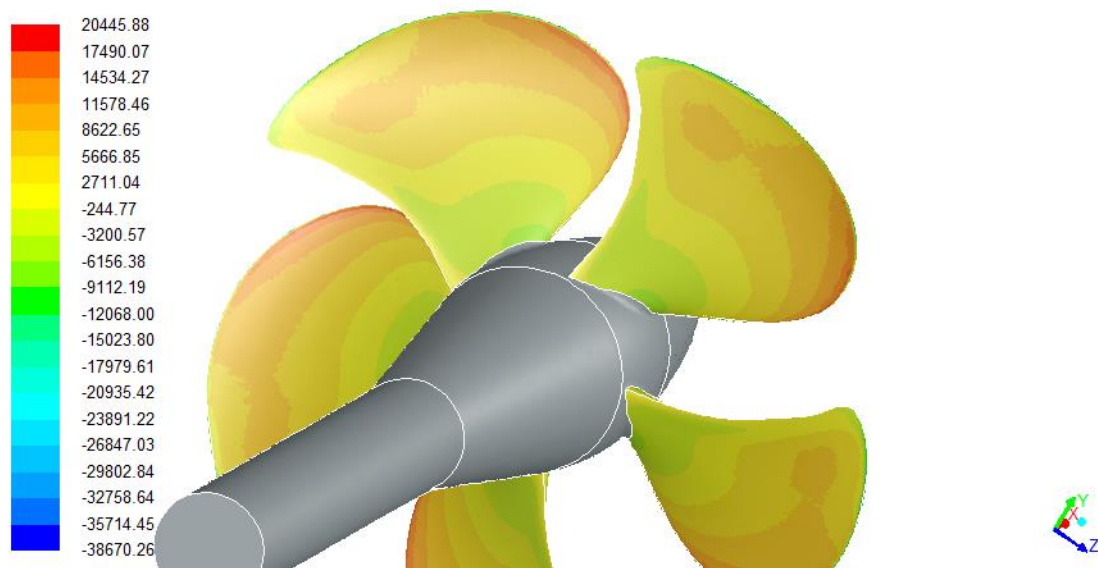


Figura 4-44 Presión 3.

5 RESULTADOS

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de empuje, par y rendimiento en la simulación de la hélice VP1304. Además se mostrarán comparados a los resultados obtenidos por el ensayo de la hélice en el canal hidrodinámico facilitados por el informe del ensayo experimental [8].

Generalmente estos resultados se muestran adimensionalizados, presentándose como K_T y K_Q . La adimensionalización de las variables se explicó en el apartado “Adimensionalización de las variables de funcionamiento” de la memoria.

En la Tabla 6 podemos ver los resultados adimensionales del ensayo y en la Tabla 7 los resultados adimensionales de la simulación.

Además en la Figura 5-1 se puede observar una gráfica en la que se representan los resultados de la simulación frente a los experimentales. En línea continua se observa el coeficiente de par (K_{To}), el coeficiente de empuje (K_{Qo}) y el rendimiento (η_o) del obtenido en el ensayo experimental frente al coeficiente de avance (J), mientras que en línea continua con puntos se observan los obtenidos mediante simulación.

Por último en la Tabla 8 se puede ver una comparación entre los resultados obtenidos. En la cual a la derecha de cada columna encontramos el porcentaje de proximidad que tiene el resultado obtenido por simulación con respecto al resultado obtenido experimentalmente.

No.	J	K_T	$10K_Q$	n	$Re [10e-6]$
1	0.13	0.77	1.76	0.09	0.77
2	0.27	0.74	1.69	0.19	0.77
3	0.40	0.69	1.58	0.28	0.78
4	0.53	0.63	1.46	0.36	0.79
5	0.67	0.57	1.35	0.45	0.80
6	0.80	0.50	1.22	0.52	0.81
7	0.93	0.43	1.09	0.59	0.83
8	1.07	0.36	0.94	0.65	0.85
9	1.20	0.29	0.80	0.68	0.87
10	1.33	0.21	0.65	0.70	0.89
11	1.47	0.14	0.48	0.66	0.92
12	1.60	0.05	0.29	0.42	0.95
13	1.68	-0.01	0.16	-0.21	0.96

Tabla 6 Resultados adimensionales ensayo.

No.	J	KT	$10KQ$	n	$Re [10e-6]$
1	0.13	0.90	1.95	0.10	0.76
2	0.27	0.83	1.79	0.20	0.77
3	0.40	0.75	1.62	0.29	0.78
4	0.53	0.67	1.47	0.39	0.79
5	0.67	0.59	1.33	0.47	0.80
6	0.80	0.51	1.18	0.55	0.81
7	0.93	0.44	1.05	0.62	0.83
8	1.07	0.36	0.91	0.68	0.85
9	1.20	0.29	0.77	0.73	0.87
10	1.33	0.22	0.63	0.75	0.90
11	1.46	0.16	0.49	0.74	0.92
12	1.60	0.06	0.29	0.55	0.95
13	1.68	0.00	0.16	0.08	0.96

Tabla 7 Resultados adimensionales simulación.

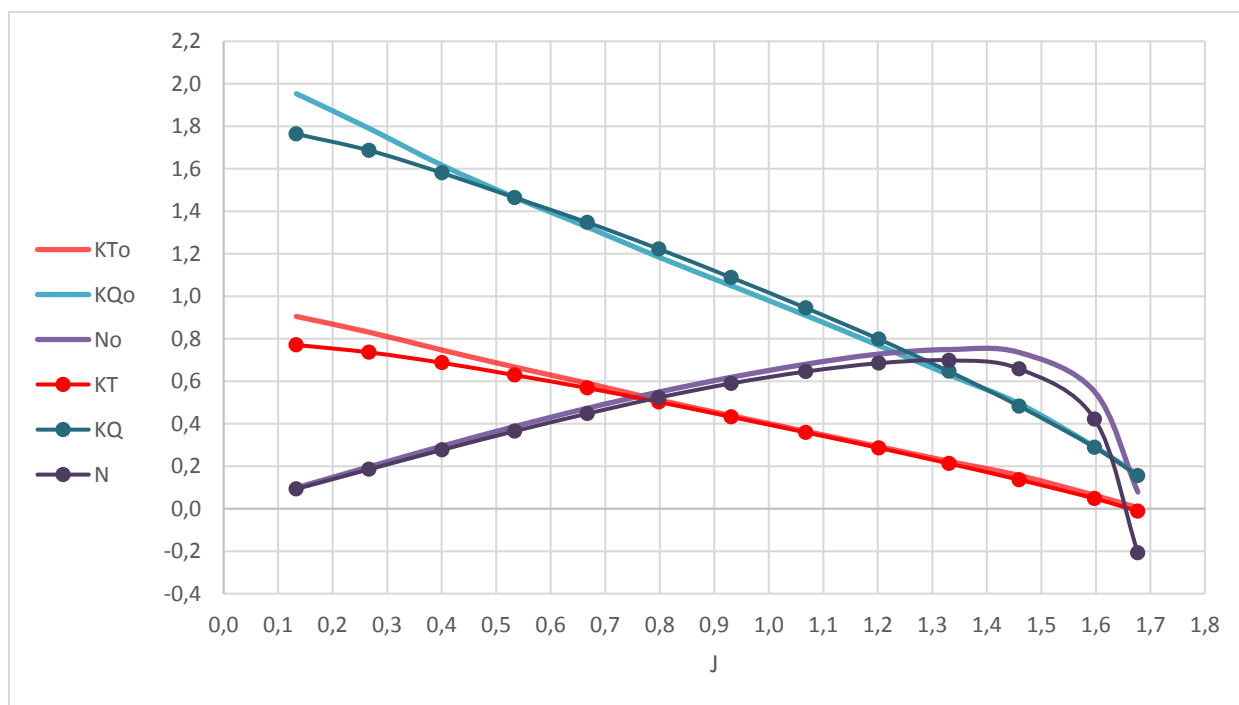


Figura 5-1 Gráfica Resultados Simulación frente a experimentales.

A la vista de los resultados, si observamos la gráfica de la Figura 5-1 y la Tabla 8, podemos observar que para la misma malla de cálculo el error relativo en los resultados es diferente en cada punto de funcionamiento. Esto es debido a que no se está capturando correctamente el desprendimiento de la capa límite. También podemos observar como a baja velocidad los resultados de la simulación es mucho mayor, esto es debido a que los modelos de turbulencia requieren que la malla tenga un tamaño adecuado en la zona de

la pared (zonas más próximas a la superficie de las palas de la hélice) y cuando el caudal es bajo (velocidad de avance baja) estos requerimientos están más lejos de cumplirse.

Una forma de conseguir unos resultados más precisos es realizando una malla más fina, y a su vez que los volúmenes de control en las zonas donde el dominio experimenta un gradiente más elevado sean más pequeños. En el caso de este proyecto esas zonas son las próximas a la superficie de la hélice. En concreto son la cara de succión, la cara de presión, los tips y el núcleo.

Sin embargo una malla más fina, como ya se explicó en la memoria anteriormente, en el apartado de la memoria “**Mallado y Control de Calidad de la malla**” desencadenaría también en mayores tiempos de computación y coste de memoria.

No obstante, los resultados obtenidos son bastante aproximados y se consideran válidos dentro de los objetivos del proyecto.

Otras empresas que han realizado el mismo cálculo CFD aplicando una malla más fina han conseguido resultados casi idénticos en la simulación a los experimentales.

V (m/s)	KT	Kto	%	10KQ	10KQo	%
0.5	0.77	0.90	85.20	1.76	1.95	90.28
1	0.74	0.83	88.59	1.69	1.79	94.21
1.5	0.69	0.75	91.97	1.58	1.62	97.78
2	0.63	0.67	94.31	1.46	1.47	99.91
2.5	0.57	0.59	96.20	1.35	1.33	98.36
3	0.50	0.51	98.09	1.22	1.18	96.77
3.5	0.43	0.44	98.62	1.09	1.05	96.34
4	0.36	0.36	98.58	0.94	0.91	96.18
4.5	0.29	0.29	97.84	0.80	0.77	96.11
5	0.21	0.22	95.32	0.65	0.63	97.46
5.5	0.14	0.16	86.84	0.48	0.49	97.59
6	0.05	0.06	-	0.29	0.29	99.13
6.3	-0.01	0.00	-	0.16	0.16	99.99

Tabla 8 Comparación resultados experimentales y simulación.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo de la memoria se extraen las conclusiones alcanzadas con la realización de este TFG y se perfilan posibles líneas futuras que continúen el camino iniciado con este TFG.

6.1 Conclusiones

Ha sido un trabajo realizado durante un corto de tiempo pero que me ha permitido extraer un gran número de conclusiones de las que quiero dejar constancia. Me ha parecido conveniente separarlas en grupos según los objetivos iniciales marcados para la realización del TFG.

6.1.1 Acerca del uso de las herramientas CAD para la caracterización de la Geometría

El trabajo con geometrías de superficies alabeadas, como es el caso de las palas de la hélice, es complejo y ver y entender la geometría de una hélice también lo es. Sin embargo gracias al programa de CAD se pudo estudiar y entender la forma de las palas con mayor facilidad. Además, la obtención de perfiles de álabe sobre la hélice también facilita el trabajo con la hélice.

A la hora de realizar mediciones sobre la estructura de la hélice, muchas de ellas no se obtienen directamente. Para la mayor parte de las mediciones es necesario la utilización de geometrías auxiliares o realizar alguna operación, como es el caso de los desarrollos cilíndricos de los perfiles de los álabes.

No obstante, gracias a los conocimientos navales obtenidos durante la formación en la Escuela Naval Militar ha sido mucho más sencillo comprender el funcionamiento y la geometría de una hélice. Aunque también es interesante que nunca me había fijado en algunos detalles de la geometría de las hélices hasta que empecé a trabajar con ellas en CAD.

Además también destacar la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante el Grado de Ingeniería Mecánica de herramientas CAD a un trabajo de entidad, con una geometría real y que se va a utilizar en operaciones posteriores.

6.1.2 Acerca de la metodología CFD en la simulación de hélices

Se ha presentado una metodología para realizar el mallado de una hélice de paso controlable.

En primer lugar se prepararon los diferentes dominios sobre la geometría en CAD. Para ello fue necesario comprender como se realizaba la simulación y que tipo de sistema de referencia se iba a utilizar (MRF) y que tipos de dominios se iban a crear. Además de cómo afectaba la creación de estos dominios, sus dimensiones y forma, a la futura obtención de resultados.

La fase de mallado es una tarea tediosa. Para realizar la malla correctamente fue necesario saber qué tipo de malla, tamaño y forma de las celdas, se iba a realizar previamente. Para ello había que ser consciente con qué número de volúmenes de control era capaz de trabajar nuestro ordenador personal. Una de las limitaciones encontradas fue

ésta, que debido a que no se disponía de un ordenador más potente la malla es modesta y por tanto los resultados no están exentos de la componente del error asociada a la discretización.

Además de la malla, otra tarea que fue bastante tediosa en el programa de mallado fue el trabajo con las superficies de las geometrías. Cuando se les dio nombre y se les estableció la condición de contorno. Fue complicado porque había que ir haciéndolo una a una con cada superficie.

El trabajo con el solver fue bastante sencillo una vez realizado correctamente todas las operaciones en el programa de mallado. No obstante para realizar las simulaciones fue necesario bastante tiempo, ya que había que hacer una simulación de cada punto de trabajo de la hélice y a continuación guardar el resultado.

En general, la metodología CFD la he encontrado bastante interesante y me ha servido para comprender cuál es la metodología que se utiliza en este tipo de cálculos, no solo para hélices, sino para turbo bombas, turbinas, aerodinámica de vehículos, aviones, misiles, etc.

6.1.3 Acerca de la concordancia de los resultados numéricos con los experimentales

Es interesante que ha sido posible alcanzar unos resultados en la simulación que se aproximan bastante a los experimentales utilizando una malla gruesa. Aunque estos resultados son válidos dentro de lo propuesto para este proyecto, los resultados obtenidos no serían válidos para el cálculo CFD de una empresa.

Sin embargo sí que me han permitido realizar el proyecto, seguir los pasos que se realizan en la metodología CFD y llegar a los resultados y gráficas típicas de este tipo de proyectos.

6.1.4 Acerca de la experimentación en canales hidrodinámicos

Se han presentado dos tipos fundamentales de ensayos en canales hidrodinámicos. Ensayos en canales de aguas tranquilas y ensayos en túneles de cavitación. Hay que destacar el desconocimiento inicial sobre los procedimientos y los resultados que se obtenían en cada uno de los ensayos.

Para la realización del proyecto ha sido necesario ampliar los conocimientos en este campo. Además a la hora de modelizar la simulación es necesario prestar atención a como ha sido realizado el ensayo experimental y comprender lo que se está calculando y como. Por ejemplo, cuando se establecen los dominios, las condiciones de contorno o los sistemas de referencia.

También la realización de este trabajo ha servido para conocer más sobre algunas actividades que realizan algunos organismos y empresas en España, como por ejemplo el Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPA).

6.1.5 Acerca de la Dirección del Trabajo de Fin de Grado con un Tutor embarcado en el Juan Sebastián De Elcano

Por último destacar que este proyecto ha sido realizado con la ayuda de un tutor que no ha estado presente en la Escuela Naval Militar durante su realización. Sin embargo el proyecto ha podido ser realizado sin ningún problema, gracias a la posibilidad de comunicarse vía Internet desde el buque Juan Sebastián de Elcano y por tanto se podría decir que esta opción es viable para futuros TFGs.

6.2 Líneas futuras

Han sido varios los puntos tratados en este TFG que podrían dar pie a posibles extensiones en futuros trabajos de fin de grado.

- Sobre el propio informe de Potsdam la 2ª fase sería comparación local de velocidades lo que permitiría tener errores locales, lo cual permitiría saber qué es lo que se está haciendo correctamente o no a la hora de comparar los resultados con los experimentales.
- La 3ª fase sería la consideración de la cavitación. Ya que en este proyecto se ha trabajado siempre fuera del rango de cavitación.
- La metodología presentada en este proyecto sirve para modelar hélices de paso fijo y controlable pero se necesitaría cambiar a Sliding-Mesh (SMM) para analizar hélices con tobera o hélices contra rotatorias. Por tanto se propone realizar los cálculos sobre hélices de este tipo para aplicar un SMM.
- En paralelo podría irse avanzando en la simulación hidrodinámica del casco. Una manera de ampliar el proyecto sería modelar el casco del buque en CAD y a continuación estudiar los resultados que se obtendría con la influencia del mismo y como se comportaría la hélice con la estela del barco.
- Se podría realizar la simulación CFD de un propulsor Pod. Los cuales están siendo utilizados cada vez más en la Armada Española. Por un lado se podría realizar la simulación de la hélice de manera aislada y en paralelo realizar la simulación de todo el conjunto del Pod (Estructura del Pod + Hélice), y a continuación comparar resultados y llegar a unas conclusiones.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. F. Oro, Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos, Reverté, 2012.
- [2] W. M. H. Versteeg, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, Prentice Hall, 2007.
- [3] «Centro de experiencias Hidrodinámicas de El Pardo,» CEHIPAR, [En línea]. Available: <http://www.cehipar.es/>. [Último acceso: 3 Marzo 2015].
- [4] «SVA Hydrodynamic Solutions,» [En línea]. Available: <http://www.sva-potsdam.de/home.html>. [Último acceso: 15 Enero 2015].
- [5] «Ship Technology,» [En línea]. Available: http://www.ship-technology.com/projects/manukai_maunawili/manukai_maunawili5.html. [Último acceso: 2015 Febrero 5].
- [6] «Youtube, Controllable pitch propellerkamewa ulstein CP propeller,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=U8AfsG2x0qk>. [Último acceso: 2015 Febrero 5].
- [7] «Submarineboat,» [En línea]. Available: <http://www.submarineboat.com/propeller.htm>. [Último acceso: 2015 febrero 5].
- [8] S. H. Solutions, «Report 3752 . Open waters Tests with the Model Propeller VP1304,» Potsdam, 2011.
- [9] A. F. Molland, MOLLAND Ship resistance and propulsion. Practical estimation of ship propulsive power, Cambridge University Press, 2011.
- [10] A. Techet, «Hydrodynamics Marine Propellers,» 2005.
- [11] I. B. Escobar, Maniobras a bordo y en la mar., Fragata Libros Nauticos, 2004.
- [12] E. C. Tupper, Introduction to Naval Architecture, Elsevier, 1975.
- [13] A. Baquero, «Teorías de Funcionamiento de la Hélice,» 2008.
- [14] I. B. Escobar, Fundamentos de Maniobra, Fragata Libros Náuticos, 2004.
- [15] J. G. P. Julián Martínez de la Calle, «Propulsores Marinos,» Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones..
- [16] M. Engineering, «Naval Architecture & Marine Engineering,» [En línea]. Available: <http://www.engin.umich.edu/college/>. [Último acceso: 11 Febrero 2015].
- [17] S. C. o. 2. ITTC, *Standard Procedure 7.5-02-03-02.1: Procedures for Resistance, Propulsion and Propeller Open Water Tests*, 2002.
- [18] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.

- [19] A. C. Martínez, Mecánica de Fluidos, Thomson, 2008.
- [20] J. S. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, Elsevier, 1994.

ANEXO I: INFORME ENSAYO EXPERIMENTAL SVA REPORT 3752

En este anexo se incluye el informe publicado por la empresa SVA Hydrodynamic Solutions el cual incluye el ensayo experimental realizado sobre la hélice VP1304 sobre la que está realizado el presente proyecto.



Potsdam Propeller Test Case (PPTC)

Open Water Tests with the Model Propeller VP1304

Report 3752

Potsdam, April 2011

Potsdam Propeller Test Case (PPTC)

**Open Water Tests
with the Model Propeller VP1304**

Client Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
Marquardter Chaussee 100
14469 Potsdam
Tel. +49 331 56712-0
Fax +49 331 56712-49

Contractor Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
Marquardter Chaussee 100
14469 Potsdam
Tel. +49 331 56712-0
Fax +49 331 56712-49

Author Dipl.-Ing. U. H. Barkmann

This report includes
5 pages text
13 pages tables
4 pages diagrams/drawings
3 pages photographs
5 pages annex

Potsdam, 15/04/2011

Management

Author

Content

Text	Page
1 Summary	1.3
2 Introduction.....	1.3
3 Tasks	1.3
4 Description of the model propeller VP1304.....	1.4
5 Test arrangement	1.4
6 Test procedure	1.5
7 Open water test results.....	1.5
8 References.....	1.6

Tables

Details of model tests	2.1
Overview of model tests in the towing tank	2.2
Pre-test with dummy hub, $V = 0$ m/s	2.3
Pre-test with dummy hub, $n = 10$ s ⁻¹	2.4
Pre-test with dummy hub, $n = 15$ s ⁻¹	2.5
Open water test, $n = 10$ s ⁻¹	2.6
Open water test, $n = 15$ s ⁻¹	2.10

Diagrams/Drawings

Model propeller VP1304	3.1
Propeller VP1304	3.2
VP1304 in open water configuration.....	3.2
Open water characteristics of VP1304	3.3

Photographs

Model propeller VP1304	4.1
Dummy hub configuration	4.2
VP1304 with caps.....	4.2
Dynamometer H39 with VP1304	4.3

Annex

Symbols	A1.1
Methods and procedures.....	A2.1
Coordinate system	A3.1

1 Summary

For the SMP'11 workshop the SVA provided the controllable pitch propeller VP1304 as a test case. Several investigations were conducted with this propeller: open water tests, cavitation tests [1] and LDV measurements [2].

The open water characteristics are presented on pages 3.2 and 3.3.

The influence of the hub and gap forces on the open water characteristic was analysed.

2 Introduction

In the intention to offer research groups the possibility to test and validate their numerical tools the SVA investigates the controllable pitch propeller VP1304. The measurements shall contribute to a better numerical prediction of open water characteristics.

Furthermore the propeller VP1304 shall become a standard test propeller within the SVA and is presented by the name PPTC, an acronym for "Potsdam Propeller Test Case". Therefore extensive tests shall expand the measurement data of this propeller.

In this report the open water characteristics measured in the towing tank of the SVA are presented.

It should be pointed out that the SVA reports 3753 [1] and 3754 [2] deal with the cavitation tests and the Laser Doppler Velocimetry (LDV) measurements respectively.

3 Tasks

The model propeller VP1304 was tested in the towing tank of the Potsdam Model Basin in homogeneous flow.

Open water characteristics were measured at two different numbers of revolutions ($n = 10$ and 15 s^{-1}).

Furthermore the resistance and idle torque of the propeller hub was investigated at the same velocities and numbers of revolutions with a dummy hub.

4 Description of the model propeller VP1304

The propeller was designed by the SVA in 1998. For the manufacture of the propeller cold-rolled brass was used as raw material. The blades were manufactured on a CNC-based milling machine with HSC (high speed cutting) technology.

The propeller main properties are shown in table 1 and in the drawing on page 3.1. Photos of the propeller are shown on page 4.1.

The propeller is a controllable pitch propeller. This affects the propeller blade design near the hub and results in a 0.3 mm gap between hub and propeller blade near the leading and trailing edge of the propeller.

Table 1: Main data of model propeller VP1304

			VP1304
Diameter	D	[m]	0.250
Pitch ratio $r/R = 0.7$	$P_{0.7}/D$	[-]	1.635
Area ratio	A_E/A_0	[-]	0.77896
Chord length $r/R = 0.7$	$c_{0.7}$	[m]	0.10417
Skew	θ_{EXT}	[°]	18.837
Hub ratio	d_h/D	[-]	0.300
Number of blades	Z	[-]	5
Sense of rotation		[-]	right
Type		[-]	controllable pitch propeller

5 Test arrangement

For the open water tests the dynamometer H39 from Kempf & Remmers has been arranged behind the propeller model. The assembly of caps, hub and propeller is shown on page 4.2. On page 4.3 the dynamometer H39 and the VP1304 are presented.

6 Test procedure

Apart from the calibration of the measuring device, runs have been made in order to measure the idle torque and the resistance of the hub cap with the dummy hub, having the same shape and mass as the real propeller hub.

Therefore the test 11F0391 provided data about the force and torque due to gap flows between hub and dynamometer shaft as well as the influence of the bearings for the condition $V = 0$ m/s.

The test runs 11F0392 and 11F0393 show the resistance and torque of the hub without blades for different advance coefficients. To eliminate the influence of the dynamometer bearings all following torque data were corrected by the dummy hub values.

In order to obtain the thrust create by the propeller blades the measured thrust was corrected by the resistance of the dummy hub.

The open water tests were carried out at two different numbers of revolutions to evaluate the dependency on the Reynolds number.

7 Open water test results

The measurements with different numbers of revolutions feature an influence of the Reynolds number on the open water characteristic (see page 3.1). The characteristics of K_T and $10K_Q$ at higher numbers of revolutions show a smaller gradient and cross the characteristics of lower numbers of revolutions at an advance coefficient of $J = 1.3$.

Therefore the open water efficiency maximum of $\eta_O = 0.7$ is reached at higher Reynolds numbers and the advance coefficient $J = 1.29$ for the propeller without a hub correction (see page 3.2).

The correction of the measured propeller thrust with the hub resistance leads to significant higher efficiencies and advance coefficients $J(\eta_{O,max})$. The maxima efficiencies of all configurations are summarised in table 2.

Table 2: Open water efficiency maxima (by polynomials)

rps [s ⁻¹]	configuration	$J(\eta_{O,max})$ [-]	$\eta_{O,max}$ [-]
10	blades and hub	1.27	0.690
10	only blades	1.33	0.738
15	blades and hub	1.29	0.700
15	only blades	1.36	0.751

8 References

- [1] Heinke, H.-J.
Potsdam Propeller Test Case (PPTC) - Cavitation Tests with the Model Propeller VP1304
Report 3753, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, April 2011

- [2] Mach, K.-P.
Potsdam Propeller Test Case (PPTC) - LDV velocity measurements with the Model
Propeller VP1304
Report 3754, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, April 2011

Details of model tests

VP1304

Towing tank

Dimensions of towing tank 280 x 9 x 4.5 m

Propeller:

VP1304

Propeller type

controllable pitch propeller

Material of model propeller

brass

Diameter of the propeller

0.25 m

Sense of rotation

right (looking on pressure side)

Arrangement:

Shaft inclination

0°

Dynamometer shaft

behind the propeller

Measuring equipment:

dynamometer H39

$n_{\max} = 60 \text{ s}^{-1}$

$T_{\max} = 1 \text{ kN}$

$Q_{\max} = 50 \text{ Nm}$

Overview of model tests in the towing tank

Test No.	Date	Test	Test parameters	Table	Diagram
11F0391	08/04/2011	Idle torque and gap forces with dummy hub	$V = 0 \text{ m/s}$ $n = 10 - 20 \text{ s}^{-1}$	2.3	-
11F0392	08/04/2011	Idle torque and forces with dummy hub	$V = 0 - 4 \text{ m/s}$ $n = 10 \text{ s}^{-1}$	2.4	-
11F0393	08/04/2011	Idle torque and forces with dummy hub	$V = 0 - 6 \text{ m/s}$ $n = 15 \text{ s}^{-1}$	2.5	-
11F0394	08/04/2011	Open water test	$V = 0 - 4.14 \text{ m/s}$ $n = 10 \text{ s}^{-1}$	2.6 - 2.9	3.1, 3.2
11F0395	08/04/2011	Open water test	$V = 0 - 6.3 \text{ m/s}$ $n = 15 \text{ s}^{-1}$	2.10 - 2.13	3.1, 3.2

Pre-test with dummy hub, $V = 0$ m/s

Test **11F0391** Date 08.04.2011
Type of test **Idle torque and gap force measurement with dummy hub, $V = 0$ m/s**

Particulars of the dummy hub

d_h [m] **0.075**
Sense of rotation right-handed

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured values

No.	V [m/s]	n [rps]	R [N]	Q [Nm]
1	0.000	9.988	-0.44	0.205
2	0.000	10.035	-0.38	0.189
3	0.000	14.985	-0.72	0.200
4	0.000	15.043	-0.73	0.228
5	0.000	20.029	-1.28	0.229

Pre-test with dummy hub, $n = 10 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0392** Date 08.04.2011
Type of test **Idle torque and force measurement with dummy hub, $n = 10 \text{ s}^{-1}$**

Particulars of the dummy hub

d_h [m] **0.075**
Sense of rotation right-handed

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured values

No.	V [m/s]	n [rps]	R [N]	Q [Nm]
1	0.000	10.035	-0.46	0.215
2	1.000	10.033	-1.75	0.198
3	2.000	10.033	-3.08	0.201
4	2.999	10.034	-5.30	0.206
5	4.000	10.032	-8.40	0.207

Pre-test with dummy hub, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0393** Date 08.04.2011
Type of test **Idle torque and force measurement with dummy hub, $n = 15 \text{ s}^{-1}$**

Particulars of the dummy hub

d_h [m] **0.075**
Sense of rotation right-handed

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured values

No.	V [m/s]	n [rps]	R [N]	Q [Nm]
1	0.000	14.985	-0.77	0.214
2	0.999	15.036	-2.88	0.210
3	1.998	15.035	-4.34	0.215
4	3.000	15.034	-6.51	0.215
5	4.001	15.030	-9.55	0.215
6	5.002	15.029	-13.62	0.219
7	6.000	15.029	-18.45	0.223

Open water test, $n = 10 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0394** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and gap force**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured and corrected values

No.	V [m/s]	n [rps]	T [N]	Q [Nm]
1	0.000	9.981	371.07	20.217
2	0.399	9.981	347.16	18.867
3	0.803	9.982	310.51	16.885
4	1.202	9.982	272.74	15.032
5	1.602	9.983	234.67	13.291
6	2.002	9.985	198.42	11.665
7	2.399	9.986	163.50	10.116
8	2.799	9.987	126.06	8.374
9	3.203	9.986	90.19	6.646
10	3.600	9.984	54.60	4.890
11	3.999	9.985	11.14	2.605
12	4.136	9.988	-4.91	1.738

Open water test, $n = 10 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0394** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and gap force**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Characteristic of propeller (model scale)

No.	J	K_T	$10K_Q$	η_O	C_{Th}	Re [10 ⁻⁶]
1	0.0000	0.9545	2.0801	0.000	999.99	0.509
2	0.1600	0.8929	1.9412	0.117	88.78	0.510
3	0.3217	0.7986	1.7370	0.235	19.65	0.514
4	0.4816	0.7014	1.5463	0.348	7.70	0.521
5	0.6418	0.6034	1.3669	0.451	3.73	0.530
6	0.8021	0.5100	1.1994	0.543	2.02	0.542
7	0.9610	0.4202	1.0399	0.618	1.16	0.555
8	1.1212	0.3239	0.8606	0.672	0.66	0.571
9	1.2830	0.2318	0.6832	0.693	0.36	0.589
10	1.4422	0.1404	0.5029	0.641	0.17	0.608
11	1.6021	0.0286	0.2678	0.273	0.03	0.630
12	1.6563	-0.0126	0.1786	-0.186	-0.01	0.637

Coefficients of polynoms

p	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
K_T	0.956454	-0.347156	-0.584163	0.525066	-0.156480
$10K_Q$	2.086429	-0.908317	-0.748857	0.857837	-0.298699

Valid in area $0.000 \leq J \leq 1.656$, $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$

Open water test, $n = 10 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0394** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and hub resistance**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured and corrected values

No.	V [m/s]	n [rps]	T [N]	Q [Nm]
1	0.000	9.981	371.10	20.217
2	0.399	9.981	347.51	18.867
3	0.803	9.982	311.29	16.885
4	1.202	9.982	274.06	15.032
5	1.602	9.983	236.63	13.291
6	2.002	9.985	201.12	11.665
7	2.399	9.986	167.04	10.116
8	2.799	9.987	130.55	8.374
9	3.203	9.986	95.74	6.646
10	3.600	9.984	61.30	4.890
11	3.999	9.985	19.10	2.605
12	4.136	9.988	3.50	1.738

Open water test, $n = 10 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0394** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and hub resistance**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Characteristic of propeller (model scale)

No.	J	K_T	$10K_Q$	η_O	C_{Th}	Re [10 ⁻⁶]
1	0.0000	0.9546	2.0801	0.000	999.99	0.509
2	0.1600	0.8939	1.9412	0.117	88.87	0.510
3	0.3217	0.8006	1.7370	0.236	19.70	0.514
4	0.4816	0.7048	1.5463	0.349	7.74	0.521
5	0.6418	0.6084	1.3669	0.455	3.76	0.530
6	0.8021	0.5170	1.1994	0.550	2.05	0.542
7	0.9610	0.4293	1.0399	0.631	1.18	0.555
8	1.1212	0.3354	0.8606	0.695	0.68	0.571
9	1.2830	0.2460	0.6832	0.735	0.38	0.589
10	1.4422	0.1576	0.5029	0.719	0.19	0.608
11	1.6021	0.0491	0.2678	0.467	0.05	0.630
12	1.6563	0.0090	0.1786	0.133	0.01	0.637

Coefficients of polynoms

p	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
K_T	0.956529	-0.342733	-0.579025	0.525112	-0.156494
$10K_Q$	2.086429	-0.908317	-0.748857	0.857837	-0.298699

Valid in area $0.000 \leq J \leq 1.656$, $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$

Open water test, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0395** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and gap force**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured and corrected values

No.	V [m/s]	n [rps]	T [N]	Q [Nm]
1	0.000	14.984	835.00	45.315
2	0.500	14.984	792.09	42.773
3	1.000	14.983	726.41	39.186
4	1.501	14.983	651.87	35.385
5	2.000	14.982	580.78	32.073
6	2.500	14.981	512.66	29.013
7	3.000	15.026	445.10	26.071
8	3.498	15.023	378.40	23.102
9	4.000	14.978	309.71	19.907
10	4.500	14.974	244.70	16.791
11	5.000	15.028	183.45	13.880
12	5.502	15.080	123.69	10.968
13	6.002	15.026	37.93	6.419
14	6.301	15.029	-15.03	3.545

Open water test, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0395** Date **08.04.2011**
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and gap force**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] **0.10417** d_h/D [-] **0.30000**

Environmental data

t_w [°C] **15.6** ν [m²/s] **1.124e-6** ρ [kg/m³] **998.99**
Propeller shaft downstream

Characteristic of propeller (model scale)

No.	J	K_T	$10K_Q$	η_O	C_{Th}	Re [10 ⁻⁶]
1	0.0000	0.9531	2.0689	0.000	999.99	0.764
2	0.1334	0.9041	1.9529	0.098	129.44	0.765
3	0.2670	0.8292	1.7892	0.197	29.63	0.769
4	0.4006	0.7442	1.6158	0.294	11.81	0.776
5	0.5341	0.6631	1.4648	0.385	5.92	0.786
6	0.6676	0.5854	1.3251	0.469	3.34	0.798
7	0.7985	0.5052	1.1836	0.542	2.02	0.815
8	0.9314	0.4297	1.0493	0.607	1.26	0.831
9	1.0683	0.3538	0.9096	0.661	0.79	0.849
10	1.2021	0.2797	0.7676	0.697	0.49	0.870
11	1.3308	0.2082	0.6300	0.700	0.30	0.895
12	1.4594	0.1394	0.4944	0.655	0.17	0.922
13	1.5978	0.0430	0.2914	0.376	0.04	0.947
14	1.6769	-0.0171	0.1609	-0.283	-0.02	0.963

Coefficients of polynoms

p	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
K_T	0.955438	-0.346932	-0.629537	0.586304	-0.175174
$10K_Q$	2.076022	-0.949651	-0.719299	0.873861	-0.306054

Valid in area $0.000 \leq J \leq 1.677$, $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$

Open water test, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0395** Date 08.04.2011
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and hub resistance**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] 0.10417 d_h/D [-] 0.30000

Environmental data

t_w [°C] 15.6 ν [m²/s] 1.124e-6 ρ [kg/m³] 998.99
Propeller shaft downstream

Measured values

No.	V [m/s]	n [rps]	T [N]	Q [Nm]
1	0.000	14.984	835.00	45.315
2	0.500	14.984	792.62	42.773
3	1.000	14.983	727.63	39.186
4	1.501	14.983	653.97	35.385
5	2.000	14.982	583.92	32.073
6	2.500	14.981	517.02	29.013
7	3.000	15.026	450.84	26.071
8	3.498	15.023	385.70	23.102
9	4.000	14.978	318.74	19.907
10	4.500	14.974	255.63	16.791
11	5.000	15.028	196.45	13.880
12	5.502	15.080	138.95	10.968
13	6.002	15.026	55.60	6.419
14	6.301	15.029	4.17	3.545

Open water test, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

Test **11F0395** Date **08.04.2011**
Type of test **Open water test, corrected with idle torque and hub resistance**

Particulars of the propulsor

Propeller **VP1304** D [m] **0.25000** $P_{0.7}/D$ [-] **1.63500**
Sense of rotation right-handed $c_{0.7}$ [m] **0.10417** d_h/D [-] **0.30000**

Environmental data

t_w [°C] **15.6** ν [m²/s] **1.124e-6** ρ [kg/m³] **998.99**
Propeller shaft downstream

Characteristic of propeller (model scale)

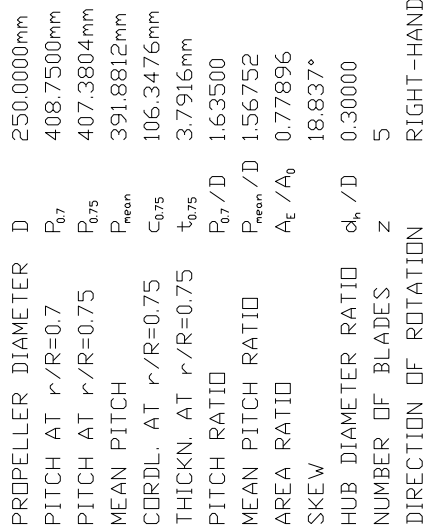
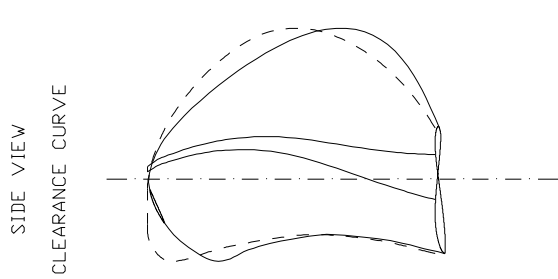
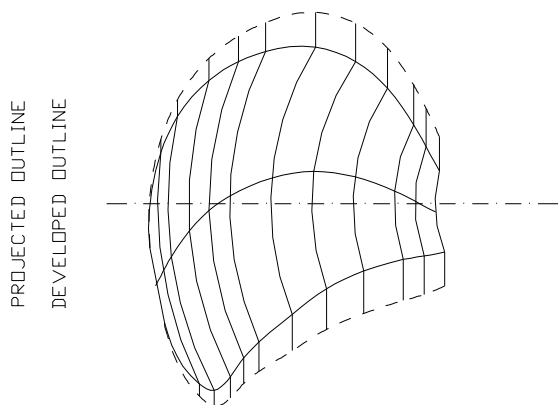
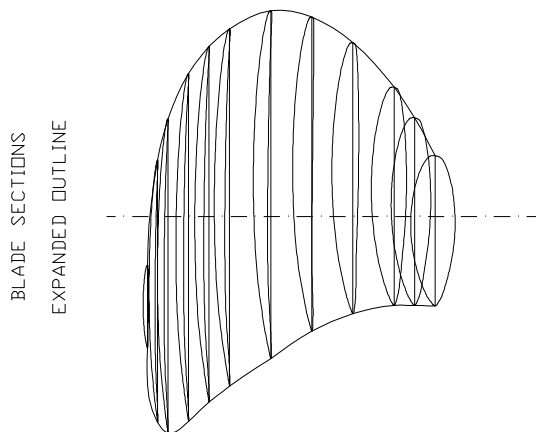
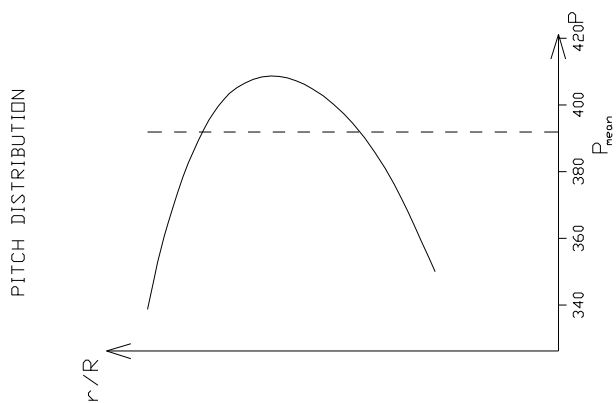
No.	J	K_T	$10K_Q$	η_O	C_{Th}	Re [10 ⁻⁶]
1	0.0000	0.9531	2.0689	0.000	999.99	0.764
2	0.1334	0.9047	1.9529	0.098	129.52	0.765
3	0.2670	0.8306	1.7892	0.197	29.68	0.769
4	0.4006	0.7466	1.6158	0.295	11.84	0.776
5	0.5341	0.6667	1.4648	0.387	5.95	0.786
6	0.6676	0.5903	1.3251	0.473	3.37	0.798
7	0.7985	0.5117	1.1836	0.549	2.04	0.815
8	0.9314	0.4380	1.0493	0.619	1.29	0.831
9	1.0683	0.3641	0.9096	0.681	0.81	0.849
10	1.2021	0.2922	0.7676	0.728	0.51	0.870
11	1.3308	0.2229	0.6300	0.749	0.32	0.895
12	1.4594	0.1566	0.4944	0.736	0.19	0.922
13	1.5978	0.0631	0.2914	0.551	0.06	0.947
14	1.6769	0.0047	0.1609	0.078	0.00	0.963

Coefficients of polynoms

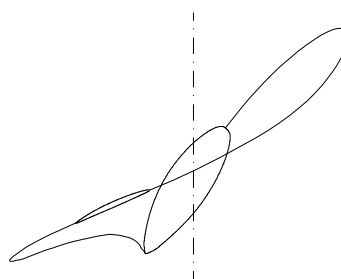
p	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
K_T	0.955439	-0.343185	-0.623945	0.586207	-0.175145
$10K_Q$	2.076022	-0.949651	-0.719299	0.873861	-0.306054

Valid in area $0.000 \leq J \leq 1.677$, $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$

Model propeller VP1304



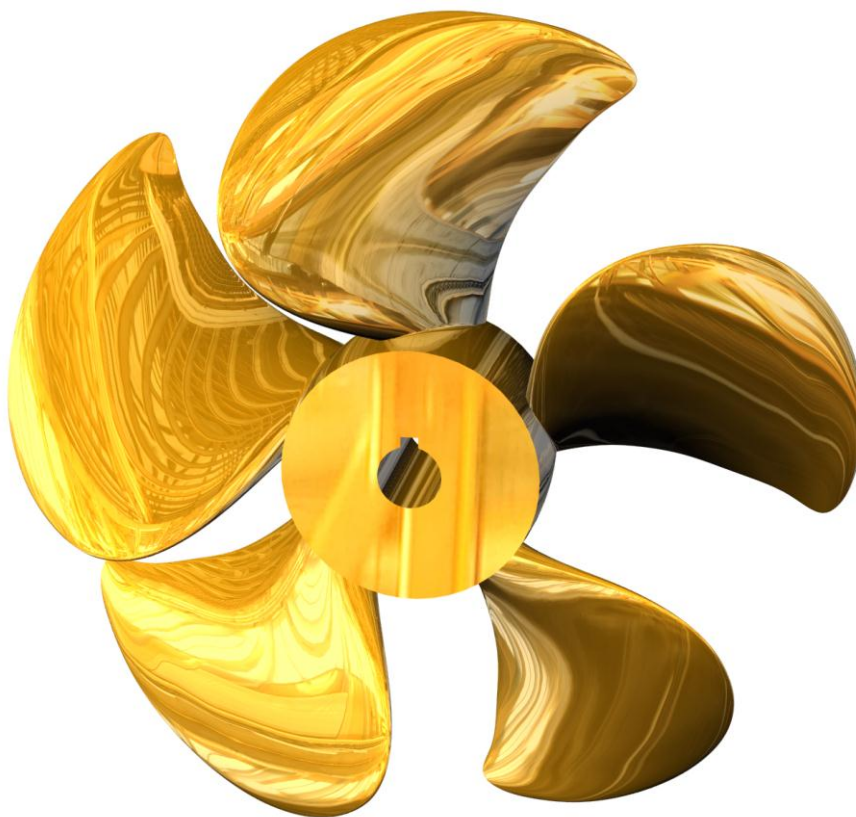
r/R	r	t	c	c_LE	f	rate	
0.30000	37.50	13.525	45.00	18.25	0.675	0.000	350.00
0.35000	43.75	12.050	56.25	29.63	1.125	-0.500	363.75
0.40000	50.00	10.688	65.42	38.79	1.570	-1.250	376.25
0.50000	62.50	8.137	81.25	52.13	2.356	-3.350	394.50
0.60000	75.00	6.050	94.17	59.83	2.837	-5.875	405.00
0.70000	87.50	4.425	104.17	61.67	3.093	-7.500	408.75
0.80000	100.00	3.250	107.08	56.29	3.052	-7.375	403.50
0.85000	106.25	2.775	106.54	50.93	2.967	-6.625	395.50
0.90000	112.50	2.375	104.17	42.83	2.672	-5.450	382.75
0.95000	118.75	2.013	94.17	29.33	2.194	-4.033	364.50
0.97500	121.88	1.825	78.67	17.00	1.715	-3.300	352.75
1.00000	125.00	1.638	25.00	-14.58	0.900	-2.500	338.75



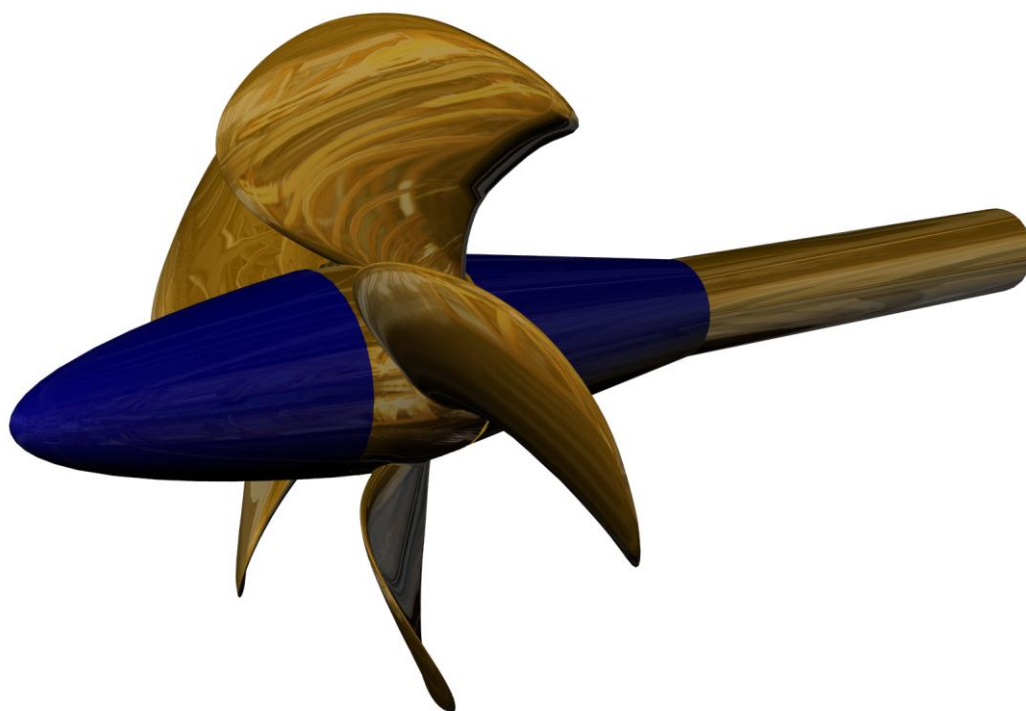
MODEL SCALE 1 : 1.000000

DIAGRAMS/DRAWINGS

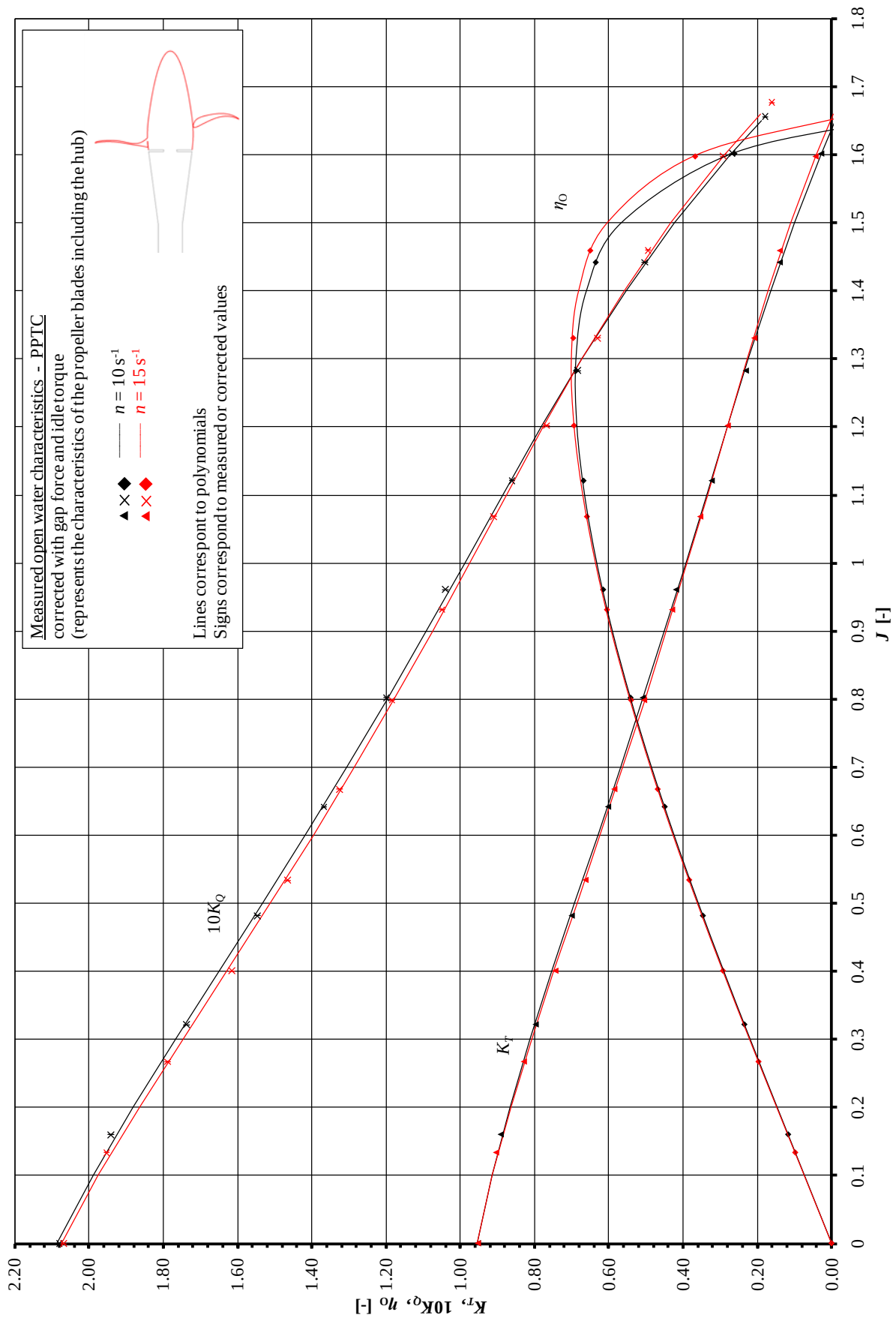
Propeller VP1304



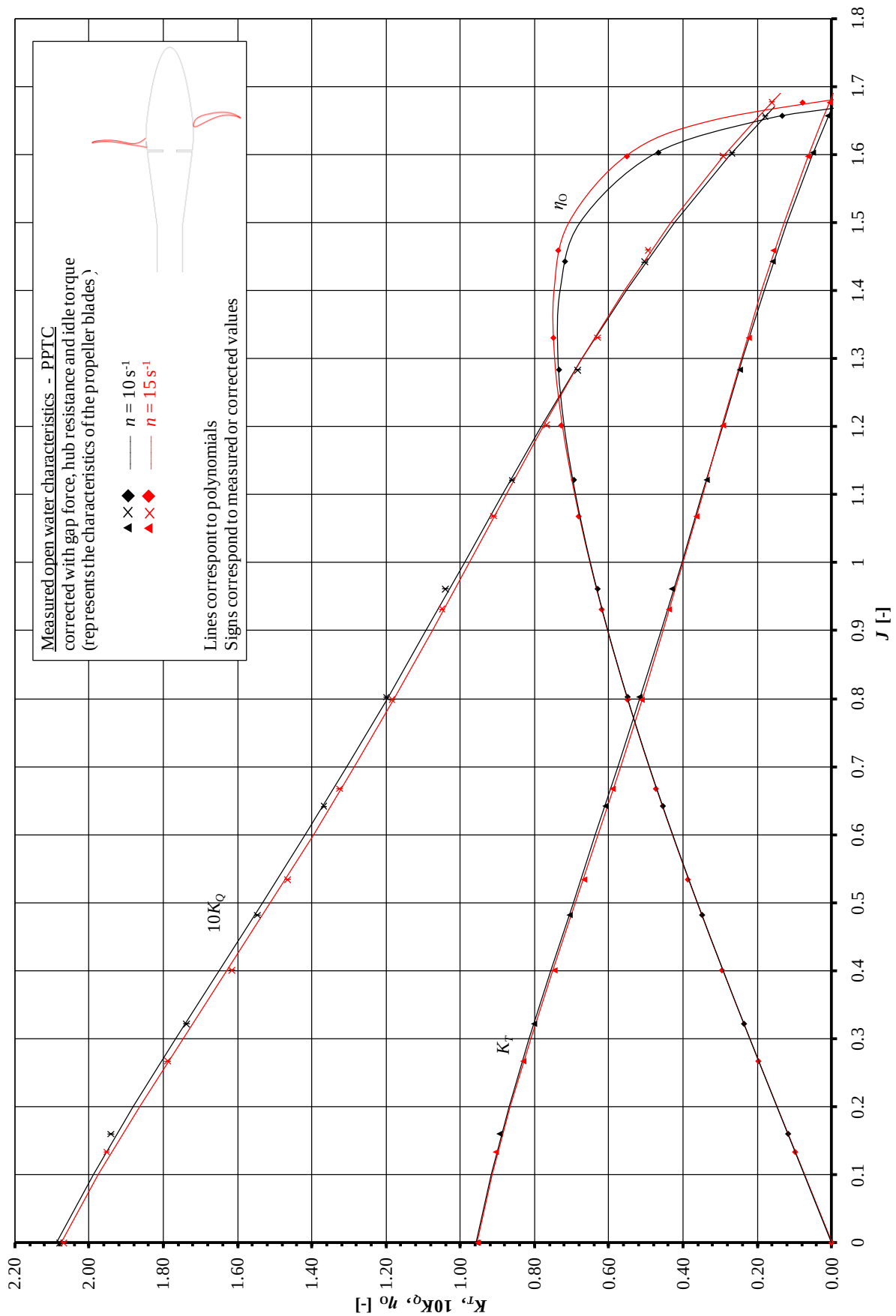
VP1304 in open water configuration



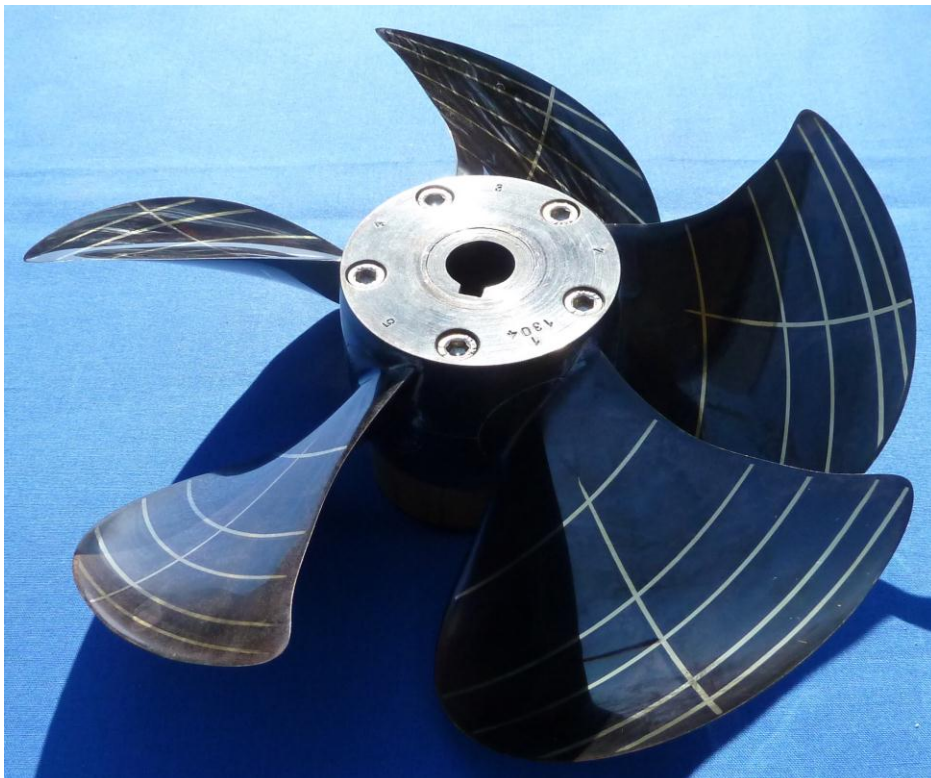
Open water characteristics of VP1304



Open water characteristic of VP1304



Model propeller VP1304

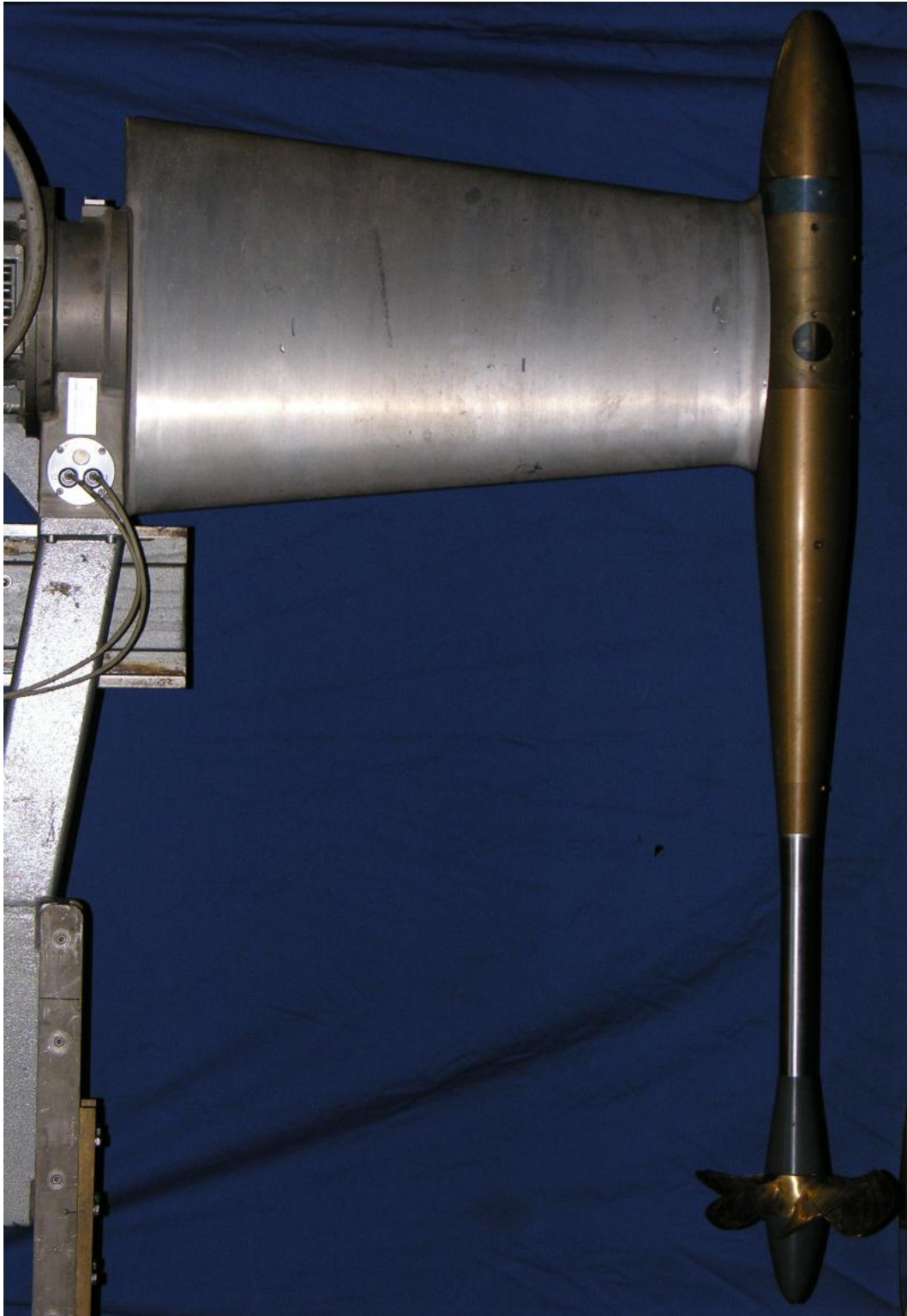


Dummy hub configuration



VP1304 with caps



Dynamometer H39 with VP1304

Symbols

symbol	name	definition or explanation	SI - unit
A_E	Expanded blade area	Expanded blade area of a screw propeller outside the boss or hub	m^2
A_0	Propeller disc area	$\pi D^2 / 4$	m^2
A_P	Projected blade area	Projected blade area of a screw propeller outside the boss or hub	m^2
C_{Th}	Thrust loading coefficient	$T / (A_P q_A) = (T_P / A_P) / q_A$	1
D	Rotor diameter		m
c	Chord length		m
d_h	Boss or hub diameter		m
F	Force		N
g	Acceleration of gravity	Weight force / mass, strength of the earth gravity field	m/s^2
n	Frequency or rate of revolution	Alias RPS (RPM in some propulsor applications)	Hz
h_0	Immersion	The depth of submergence of the propeller measured vertically from the propeller centre to the free surface	m
J	Propeller advance ratio	$V_A / (D n)$	1
K_Q	Torque coefficient	$Q / (\rho n^2 D^5)$	1
K_T	Thrust coefficient	$T / ((\rho n^2 D^4)$	1
P	Power		W
P	Pitch in general		m
p_a	Atmospheric pressure		Pa
P_D, P_P	Delivered power, rotor power	$Q \omega$	W
P_T	Thrust power	$T V_A$	W
P/D	Pitch ratio		1
Q	Torque	P_D / ω	Nm
q_A	Dynamic pressure based on advance speed	$\rho V_A^2 / 2$	Pa
R	Resistance (force)	Force opposing translatory velocity	N
R	Radius		m
Re	Reynolds number	$(c_{0.7} \cdot \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi \cdot n \cdot D)^2}) / \nu$	1
r	Radius		m

Symbols

symbol	name	definition or explanation	SI - unit
T	Thrust		N
t	Time	$-\infty \dots +\infty$	s
t_w	Temperature of water		°C
t	Blade section thickness		m
V	Velocity of a body, speed in general of the model or the ship		m/s
V_A	Advance speed	Equivalent propeller open water speed based on thrust or torque identity	m/s
Z, z	Number of blades		1
ε	Angle of rake		deg
θ	Angle of blade position		deg
λ	Scale ratio, linear scale of model	Propeller (index s) dimension divided by corresponding model (index m) dimension $\lambda = D_s / D_m$	1
μ	Viscosity		kg/ms
ν	Kinematic viscosity	μ / ρ	m ² /s
π	Circular constant	3.1415926535	1
ρ	Mass density of fluid	dm / dV	kg/m ³
ω	Propeller rotational velocity	$2 \pi n$	s ⁻¹

Indices

index	name	definition or explanation
A	Air	
c	Construction, design	
M	Model	
S	Ship	
W	Water	
max	Maximum	
min	Minimum	
0.7	According radius $r/R = 0.7$	

Methods and procedures

Open water test

The dynamometer H39 from Kempf & Remmers will be used for the open water tests (Figure A1). The configuration is with the shaft in upstream direction. The drag, the torque and the number of revolutions as well as the inflow speed will be measured during the tests.

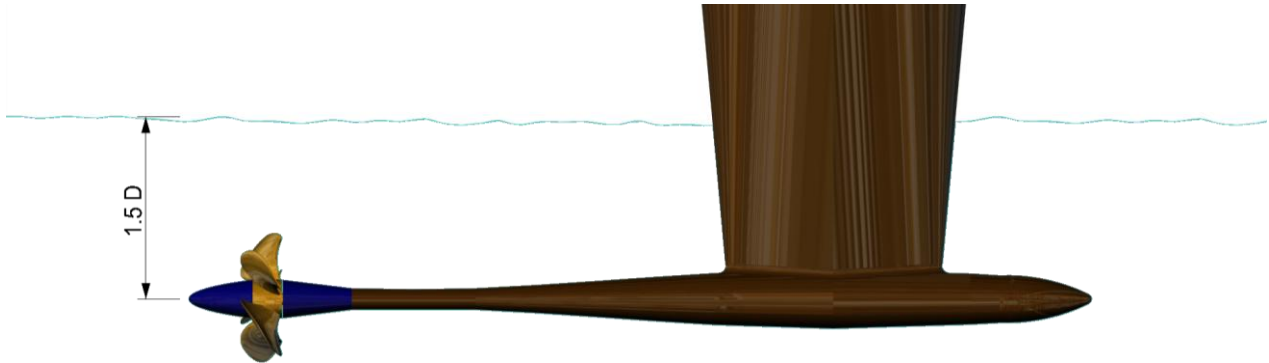


Figure A1: Test arrangement in the towing tank

Measuring values

Inflow velocity	V	[m/s]
Number of revolutions	n	[s ⁻¹]
Thrust	T	[N]
Torque	Q	[Nm]

Before the open water tests the zero reference values of thrust and torque will be determined.

The open water tests will be carried out in a range of $J = 0$ to $K_T < 0$. Variation in J will be achieved by varying the inflow speed for a given rotational speed.

During each run the measured values of drag, torque, rotational speed and inflow speed will be recorded, together with time series, maximum and minimum values and standard deviations of the signals.

The measured drag will be corrected for the effect of the streamlined hub cap.

The measured torque will be corrected for the effect frictional values of torque, taken with the shaft rotating at the same speed with an axis symmetric mass mounted at the position of the rotor.

Open water characteristics

Measuring values: T, Q, n, V

Advance coefficient $J = \frac{V}{n \cdot D}$

Thrust coefficient $K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$

Torque coefficient $K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$

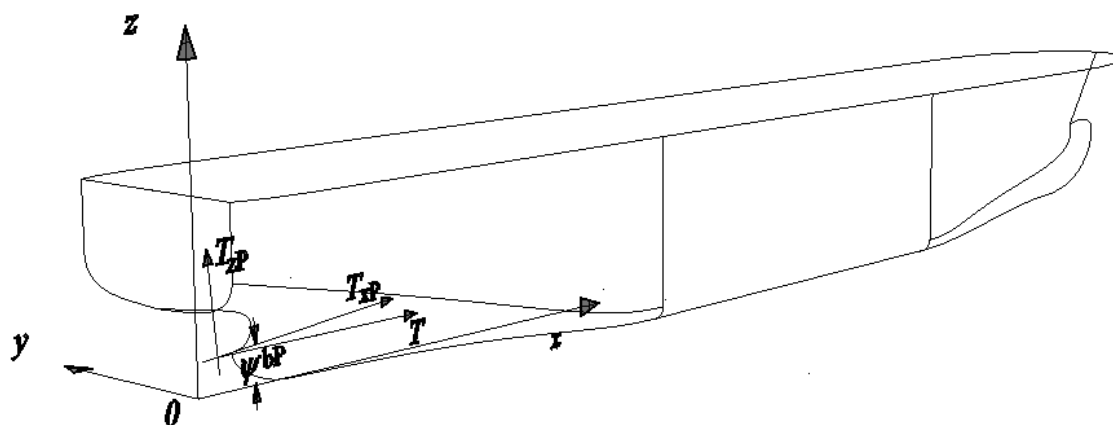
Propeller efficiency $\eta_O = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$

Reynolds number $Re = \frac{c_{0.7}}{\nu} \cdot \sqrt{V^2 + (0.7 \cdot D \cdot \pi \cdot n)^2}$

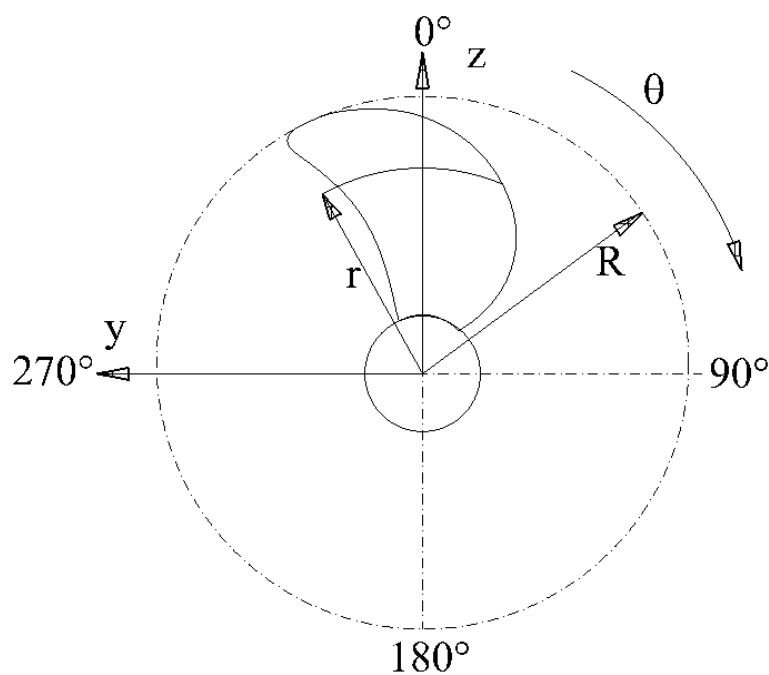
Thrust loading coefficient $C_{Th} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{K_T}{J^2}$

Coordinate system

Cartesian coordinate system



Cylindrical propeller coordinate system looking on pressure side



ANEXO II: PROCEDIMIENTO ESTANDARIZADO

7.5-02-03-02.1

En este anexo se incluye procedimiento estandarizado 7.5-02-03-02.1 emitido por la conferencia internacional de Canales de Aguas Tranquilas que establece las directrices a seguir para la realización de ensayos experimentales.

	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 1 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

Table of Contents

1 PURPOSE OF PROCEDURE	2	3.4 Calibrations.....	7
2 PARAMETERS:.....	2	3.4.1 General remarks.....	7
2.1 Data Reduction Equations	2	3.4.2 Propeller dynamometer:.....	7
2.2 Definition of Variables	2	3.4.2.1 Propeller Thrust	7
3 PROCEDURE.....	3	3.4.2.2 Propeller Torque	7
3.1 Model and Installation	3	3.4.3 Rate of revolution	7
3.1.1 Model	3	3.4.4 Speed.....	7
3.1.2 Installation.....	3	3.4.5 Thermometer.....	8
3.1.2.1 Conventional Propellers	3	3.5 Test Procedure and Data	
3.1.2.2 Ducted Propellers.....	5	Acquisition.....	8
3.2 Measurement Systems	6	3.6 Data Reduction and Analysis.....	8
3.3 Instrumentation	6	3.7 Documentation	9
3.3.1 General remarks	6	4 VALIDATION.....	9
3.3.2 Thrust	6	4.1 Uncertainty Analysis	9
3.3.3 Torque	6	4.2 Benchmark Tests	9
3.3.4 Rate of revolution	6	5 REFERENCES	9
3.3.5 Speed.....	7		
3.3.6 Temperature	7		

Updated by	Approved
Specialist Committee of 23 rd ITTC: Procedures for Resistance, Propulsion and Pro- peller Open Water Tests	23 rd ITTC 2002
Date	Date 2002

 INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines	7.5-02 -03-02.1 Page 2 of 9	
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test	Effective Date 2002	Revision 01

Open Water Tests

1 PURPOSE OF PROCEDURE

The purpose of the procedure is to ensure consistency of methodology and acquisition of correct results from Propeller Open Water Tests.

The propeller open water characteristics are used in the analysis of the Propulsion Tests and the estimation of the required power. The procedure addresses model scale only and does not consider extrapolation and full scale prediction.

The procedure is generally applicable for open water tests performed with conventional propellers, ducted propellers and tip-plate propellers.

2 PARAMETERS:

2.1 Data Reduction Equations

Thrust Coefficient $K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 D^4}$

Torque Coefficient $K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 D^5}$

Ducted Propeller

Duct Thrust Coefficient $K_{TD} = \frac{T_D}{\rho \cdot n^2 D^4}$

Thrust Coefficient $K_{TP} = \frac{T_P}{\rho \cdot n^2 D^4}$

Total thrust coefficient for a ducted propeller unit $K_{TT} = K_{TP} + K_{TD}$

Propeller Efficiency in

Open Water

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}$$

Advance Coefficient

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

Reynolds Number of propeller
Based on chord length $0.7R$

$$Re = \frac{C_{0.7R} \left(V_A^2 + (0.7\pi nD)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\nu}$$

2.2 Definition of Variables

Propeller thrust	(N)	T
Duct thrust	(N)	T_D
Ducted propeller thrust	(N)	T_P
Total thrust of a ducted propeller unit	(N)	T_T
Propeller torque	(Nm)	Q
Rate of revolutions of the model propeller	(rps)	n
Speed of advance of the model propeller	(m/s)	V_A
Chord length at $0.7R$	(m)	$C_{0.7R}$
Propeller diameter	(m)	D
Propeller radius	(m)	R
Mass density of water	(kg/m ³)	ρ
Kinematic viscosity	(m ² /s)	ν

 INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 3 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

3 PROCEDURE

3.1 Model and Installation

3.1.1 Model

The model propeller should be manufactured in accordance with Standard Procedure 7.5-01-02-02, Propeller Model Accuracy.

The fairings forward and aft of a conventional pushing propeller should be modelled according to Fig.1.

For a pulling propeller, the nose cone should be modelled accordingly.

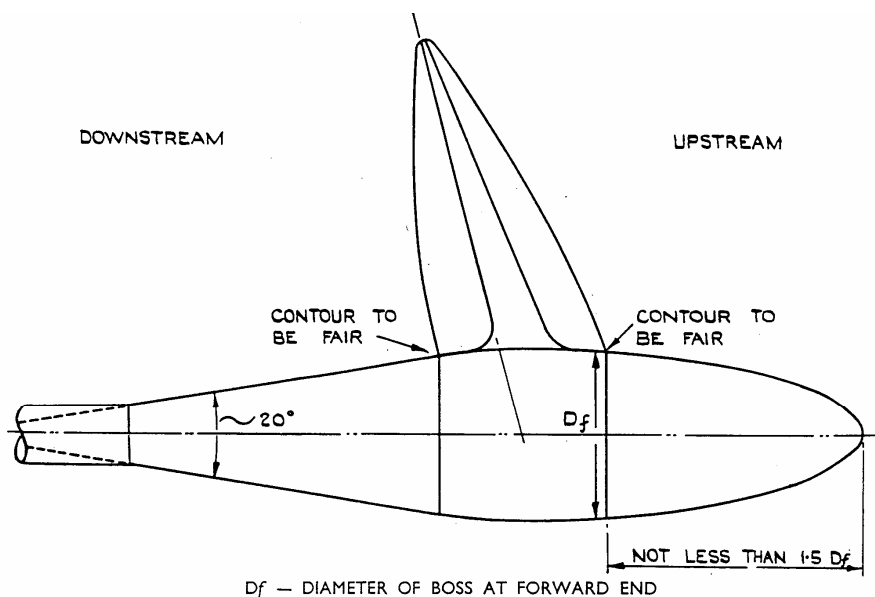


Figure 1 Geometry of Model Fairings

3.1.2 Installation

3.1.2.1 Conventional Propellers

The propeller model is to be mounted on a drive shaft. A streamlined nose cap of sufficient length to ensure that the inflow over the propeller hub is parallel to the shaft should be mounted upstream of the propeller model, Fig.1. In the case of a pulling propeller, the

nose cone should be modelled according to the actual propeller geometry. The connection between the cap and the hub should be smooth and without a gap. The size and shape of the nose cap should be recorded.

In order to eliminate a pressure build-up at the downstream end of the hub and the fixed shaft housing, the rotating part of the hub

 INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines	7.5-02 -03-02.1 Page 4 of 9	
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test	Effective Date 2002	Revision 01

should be positioned in such a way to avoid any kind of pressure build-up. The arrangement used should be recorded and included in the test report.

The drive shaft housing should not be too close to the model propeller blades. A distance of not less than $1.5 D$ to $2.0 D$ is recommended, where D is the propeller diameter. The drive shaft should be arranged parallel to the calm water surface and the carriage rails. A typical set up is shown in Fig. 2.

The propeller immersion has to be selected such that air drawing from the water surface is avoided at any test condition. As a guideline, an immersion of the propeller shaft of at least $1.5 D$ is recommended, where D is the diameter of the propeller. The immersion of the shaft

centre line should be recorded and included in the test report.

When a current meter is used to measure the speed of advance of the propeller model, the immersion of the current meter should correspond to the immersion of the propeller shaft. The distance between the propeller and the current meter should be selected to ensure that the propeller model is not influenced by the current meter. A distance between the current meter and propeller model of at least $10 D$ is recommended, where D is the diameter of the model propeller.

The dimensions of the tank should be large enough to avoid blockage and should be included in the test report.

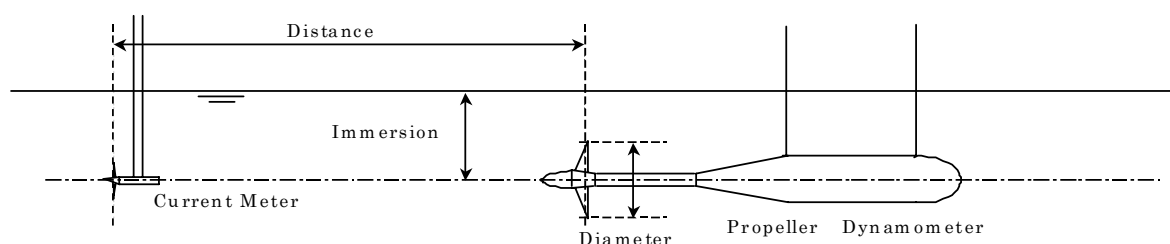


Figure 2 Typical Set Up for Tests on Conventional Propellers

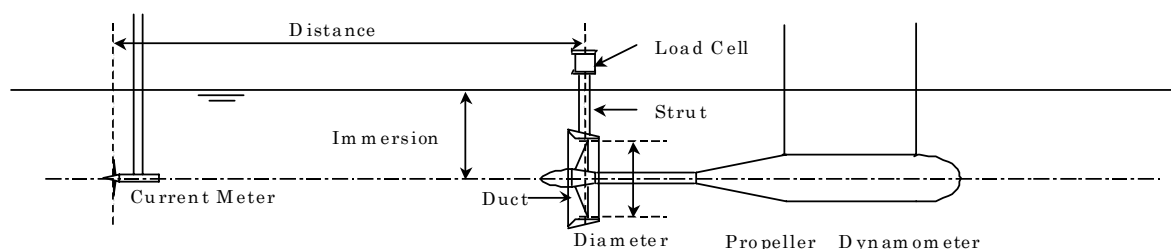


Figure 3 Typical Set Up for Tests on Ducted Propellers

 INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 5 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

3.1.2.2 Ducted Propellers

The clearance between the propeller tips and the inner surface of the duct should be kept at the recommended design value. Depending on model scale, this value sometimes cannot be achieved. Then, a maximum of 1.0 mm clearance for a scaled model propeller of about 250mm diameter is considered to be satisfactory. The relative longitudinal position of the propeller and the duct should be adjusted to the design value.

The duct is usually supported by a strut which has a streamlined section shape. Only the force acting on the duct should be measured during the test. A typical set up is shown in Fig.3.

The duct thrust is usually measured by a load cell with a shielded strut, or a strain gauge positioned between the duct and the strut. Another method is to measure the drag force acting on the strut separately as a function of advance velocity.

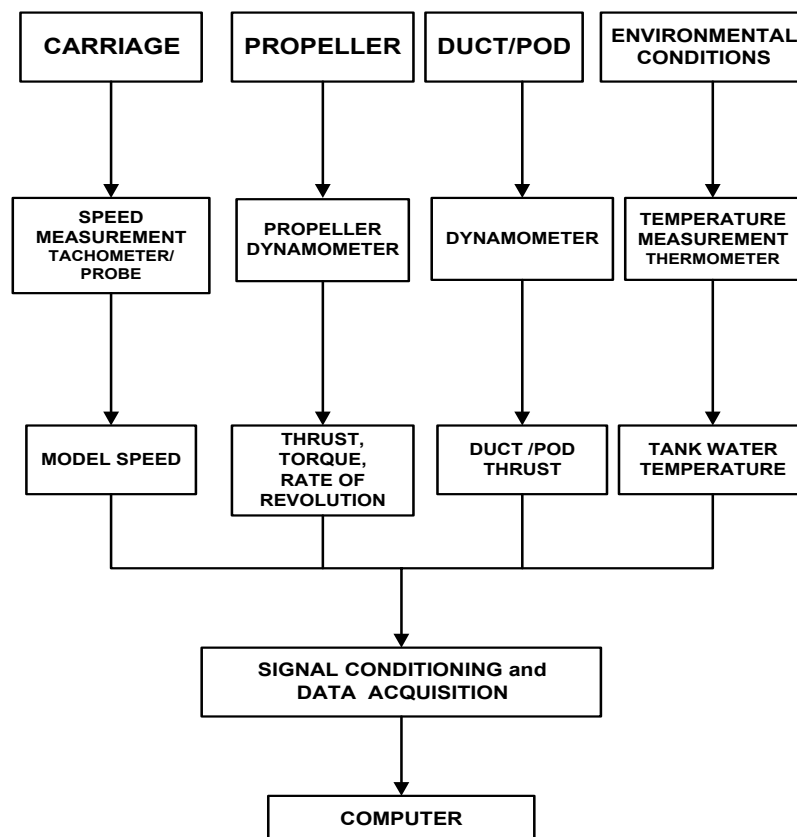


Figure 4 Typical Measurement System

	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 6 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

3.2 Measurement Systems

Fig 4. shows a typical measuring system:

The following quantities are measured:

- Model speed
- Propeller thrust
- Propeller torque
- Propeller rate of revolution
- Duct thrust (if fitted)
- Water temperature (for calculation of viscosity)

3.3 Instrumentation

3.3.1 General remarks

The performance of a propeller open water test requires the use of a propeller open water dynamometer which enables the measurement of thrust, torque and rate of revolution of the propeller. The quoted bias accuracies are for indicative purposes only. Uncertainty analysis should be used to derive the actual requirements.

3.3.2 Thrust

The propeller thrust is measured using the propeller open water dynamometer. In the case when the propeller is working in a nozzle, the additional thrust or the resistance of the nozzle has to be considered.

The thrust dynamometer should measure the thrust to within 0.2% of the maximum capacity of the dynamometer. This does not necessarily

imply that the thrust itself is measured to within the same tolerance of its true value.

3.3.3 Torque

The propeller torque is measured using the propeller open water dynamometer. In the torque measurement, it is essential to keep the shaft friction losses as low as possible.

The torque dynamometer should measure the torque to within 0.2% of the maximum capacity of the dynamometer. This does not necessarily imply that the torque itself is measured to within the same tolerance of its true value.

3.3.4 Rate of revolution

The rate of revolution of the propeller should be constant throughout the test run. Steadiness of the rate of revolution is essential in achieving reliable results.

The measurement instrumentation should measure the rate of revolution to within 0.2% of the maximum rate of revolution. This does not necessarily imply that the rate of revolution itself is measured to within the same tolerance of its true value.

The measurement instrumentation should measure the rate of revolution to within 0.2% of the maximum rate of revolution. This does not necessarily imply that the rate of revolution itself is measured to within the same tolerance of its true value.

	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 7 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

3.3.5 Speed

The speed of the propeller model should be measured to within 0.1% of the maximum carriage speed or within 3 mm/sec, whichever is the larger.

3.3.6 Temperature

The water temperature should be measured at the propeller shaft level using a thermometer.

3.4 Calibrations

3.4.1 General remarks

All devices used for data acquisition should be calibrated regularly. For calibration, the measured quantities should be either substituted by calibrated weights and pulses or checked by other measuring devices which have already been calibrated. Calibration diagrams, where the measured quantities (output values) are plotted against the calibration units (input units), may be useful to check the calibration itself, as well as the linearity of strain gauge or inductive instruments. Calibration should generally be in accordance with ITTC Recommended Procedure 7.6-01-01.

Calibrations should preferably include as much of the measurement chain as possible (amplifier, filter, A/D converter). If the check indicates that the required accuracies cannot be met, the calibration should be renewed or the instrument replaced and the check repeated. Daily checking of a pulse counter for speed measurements is usually not required. Instead,

the check on this device is covered by calibrations carried out at regular intervals.

3.4.2 Propeller dynamometer:

3.4.2.1 Propeller Thrust

The calibration of the propeller open water dynamometer in respect of the propeller thrust should be carried out statically and, if possible, dynamically with calibrated weights. The dynamic calibration should be carried out at various rates of revolution.

3.4.2.2 Propeller Torque

The calibration of the propeller open water dynamometer in respect of the propeller torque should be carried out statically and, if possible, dynamically. For the static calibration, calibrated weights are applied to a lever of known length to simulate a moment on the dynamometer shaft. The dynamic calibration should be carried out, for example, by use of an eddy current brake

3.4.3 Rate of revolution

The calibration of the respective devices should be carried out by use of precise motor speed transmitters.

3.4.4 Speed

The calibration of the carriage speed will depend mainly on how the speed is measured in each tank. The carriage speed should be checked regularly and respective records should be stored.

	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 8 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

3.4.5 Thermometer

Thermometers should be calibrated according to common standards and/or following the advice of the manufacturer.

3.5 Test Procedure and Data Acquisition

Prior to the tests, runs should be made to measure the influence of the streamlined nose cap. These measurements should be carried out with a propeller hub without blades, having the same shape as the real propeller hub. This hub should have the same weight as the propeller. Before and after each test series, the zero reference values of thrust and torque are determined. Zeros should be checked between runs to ensure no drift has occurred. The range of measurements should cover that of the open water tests in terms of rotational speed and speed of advance. The way these measurements are carried out, and the results, should be recorded.

In the case of pulling propellers (where the propeller is ahead of a bossing) the influence of the propeller cap on the thrust and torque of the propeller is not relevant, as the propeller is tested in the same configuration as that used behind the ship.

During each open water test run, the values of thrust, torque, rate of revolution and speed of advance are recorded simultaneously. When the propeller works in a nozzle, or is designed to be used on pods or conventional Z-drives, the forces of such devices in the direction of the propeller shaft should also be measured.

The range of advance coefficients should cover the range from $J = 0$ until $K_T < 0$, in order to determine accurately the point at which $K_T = 0$.

There should be sufficient waiting time between consecutive runs in order to achieve similar conditions and to obtain consistent results. This waiting time will depend on the size and type of model, model speed and test facility. The waiting times should be recorded.

The propeller open water tests should be conducted at least at two Reynolds Numbers; one should be at the Reynolds Number used for the evaluation of the propulsion test and the other should be as high as possible.

3.6 Data Reduction and Analysis

The model data derived from the experiment, namely thrust, torque and rate of revolution, should be plotted against the speed of advance. The measured thrust and torque are to be corrected for the effect of the streamlined nose cap, as determined before and/or after the actual open water test. The respective curves should be faired and the model values corresponding to required speeds of advance should be taken from the diagram.

The measured duct force (resistance or thrust) should be corrected for the effect of the (streamlined) support strut, as determined before or after the actual open water test.

Values of water density and viscosity should be determined according to ITTC Recommended Procedure 7.5-02-01-03.

	ITTC – Recommended Procedures and Guidelines		7.5-02 -03-02.1 Page 9 of 9
	Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Propulsor Open Water Test		Effective Date 2002 Revision 01

The required values of K_T , (K_{TD}), K_Q , η_0 and J are calculated according to the data reduction equations given in Section 2.1.

3.7 Documentation

The results from the test should be collated in a report which should contain at least the following information:

- Model Propeller Specification:
 - Identification (model number or similar)
 - Model scale
 - Main dimensions and particulars (see recommendations of ITTC Recommended Procedure 7.5-01-01-01 Ship Models)
 - Immersion of centreline of propeller shaft
- Particulars of the towing tank, including length, breadth and water depth
- Test date
- Parametric data for the test:
 - Water temperature
 - Water density
 - Kinematic viscosity of the water
 - Reynolds Number (based on propeller blade chord at $0.7R$)
- For each speed the following data should be given as a minimum:
 - Thrust and torque of the propeller
 - Rate of revolution
 - Force of nozzle in the direction of the propeller shaft

4 VALIDATION

4.1 Uncertainty Analysis

Uncertainty analysis should be performed in accordance with Uncertainty Analysis in EFD, Uncertainty Assessment Methodology as described in QM 7.5-02-01-01 and Uncertainty Analysis in EFD, Guidelines for Uncertainty Assessment as described in QM 7.5-02-01-02. In addition to the above, an example Uncertainty Analysis Example for Propeller Open Water Test is provided in ITTC Recommended Procedure 7.5-02-03-2.2.

4.2 Benchmark Tests

Benchmark data are collected and described in 'Benchmark Database for CFD, Validation for Resistance and Propulsion, QM 7.5-03-02-02

5 REFERENCES

- (1) ITTC 1999, Propulsion, Propulsor Open Water Test, 22nd International Towing Tank Conference, Seoul/Shanghai, ITTC Recommended Procedure 4.9-03-03-02, Revision 00.