

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis cinemático e hidrodinámico del propulsor Voith-Schneider

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Nuevo Martínez

DIRECTOR: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis cinemático e hidrodinámico del propulsor Voith-Schneider

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

El Voith-Schneider es un propulsor naval cuyo funcionamiento es relativamente innovador, y sobre el cual hay pocos estudios realizados en España. Teniendo en cuenta sus numerosas ventajas y aplicaciones en buques que requieran de gran maniobrabilidad, como son los cazaminas clase Segura de la Armada Española, es de gran utilidad el realizar un estudio sobre sus características cinemáticas e hidrodinámicas para poder conocer más en profundidad el funcionamiento de estos propulsores.

Partiendo de un modelo físico del propulsor, se va a realizar un modelado geométrico de todas sus partes para poder representarlo en tres dimensiones en un ordenador, con ayudas de programas de diseño CAD. Una vez realizado este modelado, se procede con la ayuda de otros software de ingeniería al análisis cinemático e hidrodinámico del mismo.

Gracias a la metodología de simulación de movimiento y CFD se ha podido aproximar con cierta precisión el comportamiento de este propulsor. Además, los resultados obtenidos de la simulación han sido comparados con un modelo de funcionamiento simplificado que hace uso de los coeficientes de arrastre y sustentación de perfiles.

PALABRAS CLAVE

Voith-Schneider, Propulsor, CFD, Cinemática, Hidrodinámica.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle al profesorado del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar todos los conocimientos que me han inculcado durante estos cinco años, sin los cuales nunca habría sido posible la realización de este TFG.
Un lugar muy especial para darle las gracias a mi director de trabajo, Antonio, por su constante apoyo durante el transcurso de estos meses de duro trabajo. No sólo a nivel académico con su constante disponibilidad para atender mis dudas, sino por toda la motivación que me ha dado para conseguir que me entusiasme un campo de trabajo que, hasta ahora, prácticamente desconocía.
A mis padres, María José y Emilio, a mi hermana Elena, a mis abuelos Male y Pepe, y a mi tío Miguel. Por su ayuda en los momentos complicados y constante preocupación (a veces demasiada) por saber como iba avanzando el trabajo.
Agradecerles, por supuesto, a mis compañeros de camareta: Javier, Alfonso y Jose Manuel, el poder compartir entre todos la carga que ha supuesto para los cuatro la realización de nuestros TFG's, y por los momentos divertidos para descargar tensión cuando hacía falta.
Y por último, como no podía faltar, a mi novia Isabel. Gracias por tu paciencia y comprensión estos meses, especialmente en los momentos que parecía que no podía más. Gracias por enseñarme a seguir avanzando y no darme por vencido pase lo que pase.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 6
1 Introducción y objetivos 7
1.1 Alcance del trabajo 7
1.2 Objetivos 7
1.3 Modelo de propulsor a utilizar 7
1.4 Programas informáticos a utilizar 8
1.4.1 Siemens NX 8
1.4.2 Ansys Workbench 8
1.5 Estructura de la memoria 8
2 Estado del arte 10
2.1 Tipos de propulsores navales 10
2.1.1 Reseña histórica 10
2.1.2 Propulsores modernos 11
2.2 Características de propulsión e hidrodinámica del Voith-Schneider 18
2.2.1 Características cinemáticas [25] 18
2.2.2 Características hidrodinámicas [27] 21
3 Creación del modelo CAD 22
3.1 Representación gráfica en 3D 22
3.1.1 Intrumentos de medida 22
3.1.2 Partes del modelo 22
3.1.3 Álabes 23
3.1.4 Soporte principal 25
3.1.5 Círculo guía 26
3.1.6 Soporte pentagonal 26
3.1.7 Sujeción de álabe 27
3.1.8 Tapa de soporte 28
3.1.9 Palanca de control 30
3.1.10 Tapa inferior 31
3.1.11 Tapa superior 32
3.1.12 Sujeción de motor 33
3.1.13 Motor 34
3.2 Ensamblado de piezas 35

3.2.1 Soporte ensamblado 35
3.2.2 Ensamblaje completo 36
4 Simulaciones 38
4.1 Simulación cinemática [30] 38
4.2 Simulación hidrodinámica [31] 43
4.2.1 Importación y diseño de la sección 43
4.2.2 Mallado 44
4.2.3 Análisis hidrodinámico 48
5 Justificación de resultados 54
5.1 Datos de partida para el modelo del trabajo 54
5.2 Datos para resolución analítica de velocidades y fuerzas [32] 56
6 Conclusiones y líneas futuras 60
6.1 Conclusiones 60
6.1.1 Conclusiones sobre la utilización del software de CAD y simulación de movimiento de Siemens NX 60
6.1.2 Conclusiones sobre la utilización del software de Ansys 60
6.1.3 Conclusiones sobre todo el proceso de realización del TFG 61
6.2 Líneas futuras 61
7 Bibliografía 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Voith-Schneider Propeller VSP65.BM [1] 8
Figura 2-1 Barcaza egipcia del siglo XV a.C. y fragata española del siglo XVIII [2] [3] 10
Figura 2-2 Barco propulsado por rueda de paletas. Siglo XIX [4] 11
Figura 2-3 Tipos de combinaciones diésel-turbina [6] [7] [8] [9] [10] 12
Figura 2-4 Hélice convencional [11] 12
Figura 2-5 Hélice de paso controlable [12] 13
Figura 2-6 Hélice con tobera y principio de funcionamiento [13] [14] 14
Figura 2-7 Funcionamiento de propulsión a chorro [15] 14
Figura 2-8 USS Independence, US Navy, propulsado por 4 hidrojets [17] 15
Figura 2-9 Hélice CLT [19] 15
Figura 2-10 Propulsor azipodal y LHD Juan Carlos I [20] [21] 16
Figura 2-11 Hélice CRP de torpedo y combinación POD-CRP [22] [23] 16
Figura 2-12 Geometría de movimiento de propulsores Kisten-Boeing y Voith-Schneider [24] 17
Figura 2-13 Trayectorias de diferentes propulsores cicloidales [24] 18
Figura 2-14 Enlaces álabe-palanca de control de buque genérico y modelo escogido [25] 19
Figura 2-15 Trayectoria cicloidal [25] 19
Figura 2-16 Principio de funcionamiento del VSP [26] 20
Figura 3-1 Pie de rey [28] 22
Figura 3-2 Generador de perfiles [29] 23
Figura 3-3 Archivo de coordenadas de una spline del perfil del álabe 23
Figura 3-4 Importación de coordenadas y trazado de splines 24
Figura 3-5 Secciones del perfil representadas 24
Figura 3-6 Representación final de álabe 25
Figura 3-7 Proceso de diseño del soporte 25
Figura 3-8 Proceso de diseño del círculo guía 26
Figura 3-9 Diseño y extrusión de pentágono y salientes de fijación de álabes 26
Figura 3-10 Extrusiones de raíl guía y apoyo para palanca de control 27
Figura 3-11 Croquis y extrusión de partes principales de la sujeción de álabe 27
Figura 3-12 Inserciones de sujeción de álabe 28
Figura 3-13 Aspecto final de sujeción de álabe 28
Figura 3-14 Proceso de extrusionado de los refuerzos de la tapa de soporte 29
Figura 3-15 Realización de agujeros y extrusionado de salientes 29
Figura 3-16 Estrechamiento interior 30
Figura 3-17 Diseño de pieza principal de la palanca de control 30
Figura 3-18 Vista final de la palanca de control 31

Figura 3-19 Proceso de extrusionado de pieza principal y sus refuerzos 31
Figura 3-20 Extrusión de apoyo para el soporte del motor 32
Figura 3-21 Diseño final de tapa inferior 32
Figura 3-22 Extrusión por revolución. Tapa superior 32
Figura 3-23 Planos de corte para refuerzos transversales y representación final 33
Figura 3-24 Diseño de la forma base. Sujeción de motor 33
Figura 3-25 Recortes del cuerpo y extrusión de salientes. 33
Figura 3-26 Extrusiones de los refuerzos 34
Figura 3-27 Vista final de sujeción de motor 34
Figura 3-28 Diseño y extrusión de motor 35
Figura 3-29 Explosionado del ensamblaje de soporte 36
Figura 3-30 Detalle de sujeción motor con tapa inferior e inserción motor-sujeción 37
Figura 3-31 Vista general del ensamble completado 37
Figura 4-1 Inicio del módulo de simulación cinemática de Siemens NX 38
Figura 4-2 Opción 'Kinematics' para la simulación de movimiento 39
Figura 4-3 Definición de enlaces para simulación 40
Figura 4-4 Juntas deslizantes para círculo guía y soporte pentagonal 40
Figura 4-5 Junta de rotación del soporte 41
Figura 4-6 Junta y restricción de movimiento del álabe 42
Figura 4-7 Velocidades de rotación de álabe y soporte, y posiciones iniciales de pentágono y círculo 42
Figura 4-8 Resolución y animación de la cinemática del modelo 43
Figura 4-9 Establecimiento de geometría y división en varias partes de la misma 44
Figura 4-10 Inicialización del módulo de mallado con la geometría editada 44
Figura 4-11 Creación de partes significativas del modelo y selección de bordes 45
Figura 4-12 “Named selections” definidas para la sección 46
Figura 4-13 Control de mallado y método de mallado 47
Figura 4-14 Tamaño de elementos para las partes del modelo 47
Figura 4-15 Vista general y detalle de mallado 48
Figura 4-16 Inicialización de Fluent con carga del mallado realizado previamente 49
Figura 4-17 Creación de las interfaces del modelo 50
Figura 4-18 Condiciones de movimiento de las zonas del mallado 51
Figura 4-19 Condiciones de movimiento de inlet, outlet y paredes de los álabes 51
Figura 4-20 Pasos a realizar para la configuración de la animación 52
Figura 4-21 Resultados visualizados en el Ansys Fluent 53
Figura 4-22 Visualización de la animación 53

Figura 5-1 Tabla de datos experimentales para propulsores de eje vertical [26].....55

Figura 5-2 Representación gráfica de los parámetros a tener en cuenta para la resolución del problema [32].....56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1 Datos de partida. En verde aquellos datos que es necesario introducir manualmente 57
Tabla 5-2 Datos de ángulos y velocidades para el VSP....57
Tabla 5-3 Datos de fuerzas en los álabes del VSP....57

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este apartado se realizará un acercamiento al alcance del trabajo, explicando la motivación del mismo y objetivos a alcanzar. Además, se expondrá el modelo de motor Voith-Schneider sobre el cual se va a realizar el análisis y una breve explicación de los programas a utilizar.

1.1 Alcance del trabajo

En este trabajo de final de grado se va a estudiar un modelo físico de propulsor Voith-Schneider, sobre el cual se va realizar un modelado geométrico en tres dimensiones, proporcionándole las características cinemáticas adecuadas para que realice el movimiento característico del mismo. Una vez realizado esto se procederá a importar una sección de los álabes del propulsor a un simulador hidrodinámico para poder establecer una situación concreta y obtener las fuerzas y velocidades que actúan sobre los álabes. Todos estos resultados se justificarán debidamente con un apartado de cálculos analíticos basados en datos obtenidos de forma experimental de libros de investigación.

1.2 Objetivos

Los objetivos a alcanzar en el TFG son los siguientes:

- Realizar un modelado geométrico preciso de un propulsor Voith-Schneider.
- Analizar la cinemática de dicho propulsor y trasladarla al modelado.
- Escoger una sección de los álabes del propulsor para realizar un estudio hidrodinámico del mismo y obtener los parámetros del campo de velocidades para analizarlos analíticamente.
- Familiarizarse y obtener un conocimiento amplio de los programas informáticos utilizados en los campos sobre los que se trabaje.

1.3 Modelo de propulsor a utilizar

Para el presente trabajo se va a utilizar un modelado en 3D del motor Voith-Schneider fabricado por la casa alemana Bauer-Modelle, modelo VSP65.BM. Este es un modelo destinado a propulsiones de barcos por radiocontrol, por lo que hay partes que lo conforman más sencillas geométricamente que en un propulsor de un buque, tales como la transmisión que se realiza por correa y no por engranajes cónicos, y los enlaces de transmisión a los álabes que son más sencillos que en el modelo real. No obstante, posee

las características cinemáticas e hidrodinámicas adecuadas para su análisis y posterior comparación con los resultados obtenidos experimentalmente en otros estudios.



Figura 1-1 Voith-Schneider Propeller VSP65.BM [1]

1.4 Programas informáticos a utilizar

Durante el desarrollo del trabajo se va a hacer uso de diferentes programas informáticos para poder obtener la geometría y cinemática adecuadas, además de poder analizar a posteriori el comportamiento del propulsor al paso de un fluido mientras está en funcionamiento.

1.4.1 Siemens NX

El programa de Siemens NX es un software producido por Siemens PLM Software diseñado especialmente para aplicaciones de ingeniería. Este programa incluye todos los procesos de diseño de un producto industrial, abarcando todos los procesos desde su diseño en CAD hasta poder diseñar un modo de fabricación en su módulo de CAE. Además, cuenta con varios simuladores, como por ejemplo el simulador de movimiento o el de simulación FEM. Sin embargo, para el caso de este trabajo, se van a emplear dos de los componentes del software únicamente, el de diseño y creación del CAD, y la posterior simulación de la cinemática del propulsor.

1.4.2 Ansys Workbench

Desarrollado por la empresa americana Ansys Inc. la herramienta del workbench de Ansys se trata de un conjunto de programas para cálculos en CFD mayoritariamente, aunque incluye diseño de archivos CAD y otros procesos de ingeniería. Para el trabajo se emplearán tres de los programas que incuye el Workbench, el Design Modeller de diseño de piezas; el programa de mallado; y el Fluent para análisis hidrodinámico por Mecánica de Fluidos Computacional, CFD en inglés.

1.5 Estructura de la memoria

En la Introducción se pretende realizar un primer acercamiento al alcance del TFG explicando los objetivos que se pretenden alcanzar así como los programas a utilizar durante la realización del mismo y explicando el tipo de modelo de propulsor sobre el que se va a realizar el estudio.

En el capítulo del Estado del Arte se realiza una breve reseña sobre los tipos de propulsores existentes a lo largo de la historia y los más importante en la actualidad, resaltando entre ellos a los propulsores cicloidales, dentro de los cuales se encuentra el propulsor Voith-Schneider. Además, se explicará la cinemática que sigue este tipo de propulsor para que se pueda entender su funcionamiento.

En el capítulo de Creación del modelo CAD se explica como se ha diseñado el modelado geométrico de cada una de las piezas de nuestro propulsor haciendo uso del módulo de modelado del Siemens NX. Una vez realizado el diseño de las piezas, se realizará un ensamblaje de las mismas para que se pueda observar que todas se han diseñado correctamente.

En el capítulo de Simulaciones se desarrolla todo el proceso de simulación cinemática e hidrodinámica para conseguir el adecuado movimiento del propulsor y el análisis de su comportamiento dentro de un flujo de velocidad constante.

En el capítulo de Justificación de Resultados se explican todos los cálculos empleados en la resolución del problema en el análisis hidrodinámico, obteniéndose y razonando los datos de partida para la simulación hidrodinámica, y justificándose los resultados obtenidos con las ecuaciones dinámicas de los propulsores Voith-Schneider.

En el capítulo de Conclusiones y líneas futuras se exponen las conclusiones extraídas tras la realización de este trabajo, y se proponen unas posibles líneas futuras para continuar con el trabajo ya realizado.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se pretende dar una breve reseña histórica sobre los tipos de propulsores navales que han existido a lo largo de la historia, explicando en más profundidad los más importantes en la actualidad y encuadrar dentro de estos los propulsores cicloidales o Voith-Schneider, sobre los cuales se explicará su modo de funcionamiento y características cinemáticas e hidrodinámicas.

2.1 Tipos de propulsores navales

2.1.1 Reseña histórica

Históricamente, y desde que el hombre se aventuró a adentrarse en la mar, han ido surgiendo diversos medios de propulsión a lo largo de la historia. Desde los troncos de la Edad de Piedra impulsados por las propias extremidades de los hombres, hasta los últimos y más innovadores propulsores del siglo XXI, se han inventado múltiples tipos de propulsores.

El primer tipo de propulsor naval fabricado expresamente para desarrollar ese propósito podría decirse que es el remo. Este, junto con la vela, fueron los principales medios de propulsión de los barcos desde la Antigüedad hasta la Revolución industrial, avanzándose muy poco en el desarrollo de la tecnología de propulsión.



Figura 2-1 Barcaza egipcia del siglo XV a.C. y fragata española del siglo XVIII [2] [3]

Una vez con la Revolución Industrial, entre los siglos XVIII y XIX, se empezaron a introducir máquinas en la propulsión de los buques, con la consecuente decadencia de los medios tradicionales de la vela y el remo. Una de las formas de propulsión más usadas durante ese periodo fue la rueda de paletas, movida por una turbina de vapor. Este sistema se usó con gran éxito durante un gran periodo de tiempo hasta la aparición del petróleo como alternativa de combustible al carbón, y la aparición de los motores modernos. Aún así, con la rueda de paletas se consiguieron grandes logros, siendo pionera en las navegaciones a grandes distancias en buques a motor.



Figura 2-2 Barco propulsado por rueda de paletas. Siglo XIX [4]

2.1.2 Propulsores modernos

En la actualidad, con la aparición de los motores de combustión y las turbinas de gas, y con su uso extendido a prácticamente todo tipo de medios de transporte incluido el marítimo, han ido inventándose diferentes tipos de propulsores navales, los cuales han ido evolucionando según el tipo de buque en el cual se iban a implantar. En todos estos tipos de propulsores, a excepción de uno, el movimiento de genera gracias a un eje (conectado de diferentes maneras según el tipo de propulsor) que transmite el movimiento generado en un motoro turbina.

Cabe reseñar los diferentes tipos de combinaciones para generar el movimiento de propulsión basados en motores de combustión y turbinas de gas. Actualmente los más usados son los siguientes: CODAG, o combinación de motor diésel y turbina de gas, lo cual implica el funcionamiento de ambos a la vez; CODOG, el cual consiste en combinación de diésel o turbina de gas, es decir, el funcionamiento puede ser de uno u otro, no a la vez; COGAG, combinación turbina de gas y turbina de gas, ambas en funcionamiento a la vez; COGOG, combinación turbina de gas o turbina de gas; CODAD, combinación de diésel y diésel; y CODLAG, combinación de diésel eléctrico y turbina de gas [5].

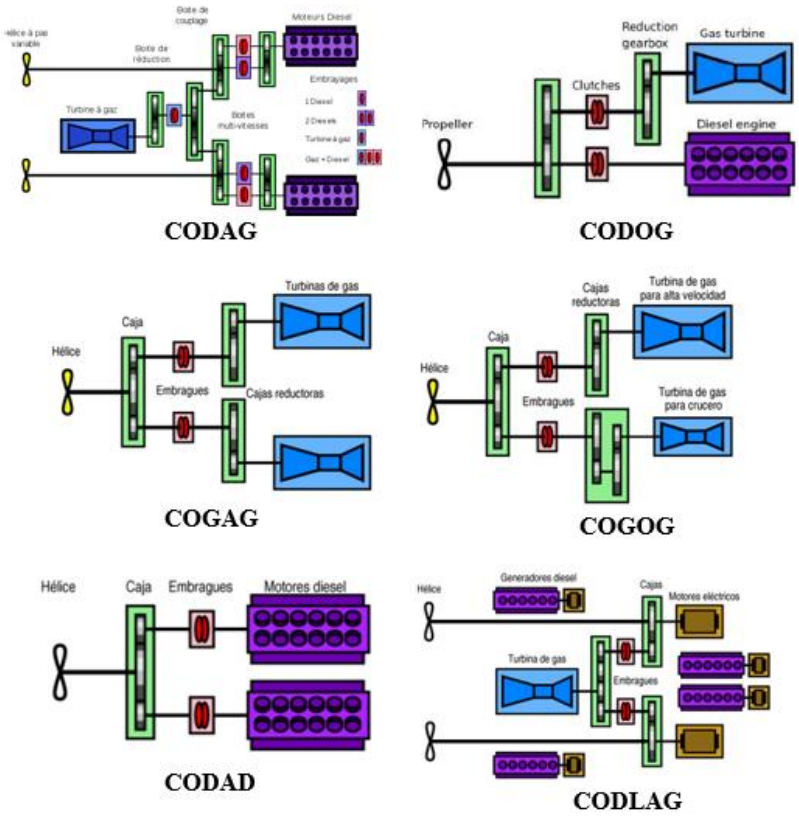


Figura 2-3 Tipos de combinaciones diésel-turbina [6] [7] [8] [9] [10]

2.1.2.1 Helices convencionales

Las hélices convencionales fueron las primeras en ser diseñadas. Consisten en un dispositivo mecánico formado por unos elementos denominados álabes, los cuales se hayan concéntricos y conectados al eje del motor, de manera que realizan un movimiento rotatorio con el cual cada pala ejerce un empuje al girar en el fluido en el que se encuentran sumergidas, produciendo el movimiento de avance en la embarcación.

La primera hélice convencional se atribuye al checo-germano Josef Ressel, el cual la patentó en el año 1826. El número de palas se ha ido variando desde sus inicios, en los cuales los diseños eran entre 3 y 6 palas, aunque con el tiempo se ha visto que los rendimientos óptimos son con hélices de 3 y 4 palas.



Figura 2-4 Hélice convencional [11]

2.1.2.2 Hélices de paso controlable

Este tipo de hélices surgieron posteriormente a las hélices de paso fijo o convencionales. La idea por la que se crearon fue el poder variar el ángulo de ataque de cada pala para aumentar o dismuir el empuje, llegando incluso a invertir la dirección del avance. Su modo de funcionamiento se basa en que cada álabe tiene su propio eje, moviéndose simultáneamente gracias a un mecanismo hidráulico situado en el interior del casco del barco que transmite el movimiento a través de un hueco en el eje de la hélice.

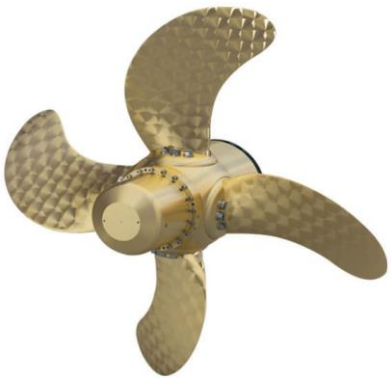


Figura 2-5 Hélice de paso controlable [12]

Por lo tanto, la principal ventaja que poseen este tipo de hélices es que variando el paso de las palas se puede cambiar la dirección del empuje dando atrás sin necesidad de variar el sentido de giro de la hélice. Además, se puede aumentar el empuje del buque sin sobrecargas en el eje por superar la curva de potencia del motor, algo que con las hélices convencionales ocurría.

2.1.2.3 Hélices con tobera

Las toberas fueron implementadas en las hélices con el propósito de aumentar el empuje que generaban las mismas. El principio que fundamentan este tipo de hélices es el de aprovechar el campo de bajas presiones que se generan a proa de la hélice para que cuando pase el fluido a través de las palas, la tobera por su posición genere fuerzas hacia proa y hacia abajo que aumenten este empuje [13].

Las ventajas que poseen este tipo de hélices son: aumentar la eficiencia al disminuir el coeficiente de carga y disminuir la diferencia de presiones entre la cara de succión y la de presión, aumentar el rendimiento al disminuir alrededor de la hélice el flujo de agua y, además, no es necesario un timón, aunque en ese caso debería dotarse de un sistema al buque para realizar las maniobras de cambios de rumbo. Por último, destacar que la tobera puede ser instalada en una hélice de paso fijo o controlable.

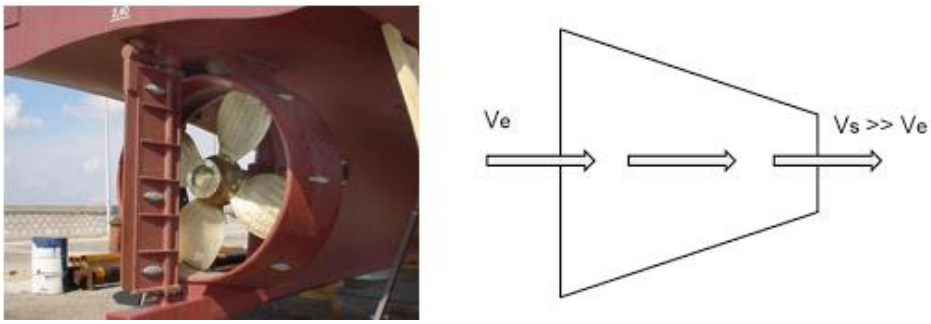


Figura 2-6 Hélice con tobera y principio de funcionamiento [13] [14]

2.1.2.4 Propulsores a chorro o hidrojets

Los principios del propulsor a chorro o hidrojets datan de finales de siglo XIX, cuando se produjeron los primeros buques experimentales propulsados por un chorro de agua, como el HMS Waterwitch en Gran Bretaña en 1866. Sin embargo, no sería hasta 1954, en Nueva Zelanda, que se conseguiría un propulsor a chorro con las características que conocemos hoy en día.

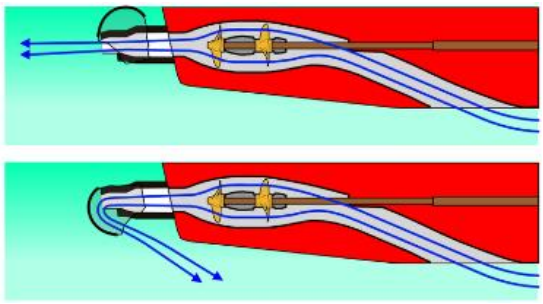


Figura 2-7 Funcionamiento de propulsión a chorro [15]

El funcionamiento del hidrojet se basa en la Tercera Ley de Newton del movimiento, por la cual cada acción genera una reacción de igual módulo y dirección, pero sentido opuesto. Por lo tanto, al expulsar con fuerza un chorro de agua a popa de la embarcación, se genera una reacción en el buque que lo impulsa hacia adelante. Esta descarga de una corriente de agua se consigue con una bomba que succiona el agua del mar y la expulsa a gran velocidad [16].

En un principio este tipo de propulsor naval se empleaba principalmente en embarcaciones de recreo, como motos de agua, aunque en la actualidad está ganando popularidad por la gran velocidad que genera para su implantación en buques de guerra como patrulleros rápidos.



Figura 2-8 USS Independence, US Navy, propulsado por 4 hidrojets [17]

2.1.2.5 Hélices CLT

Las hélices CLT (Contracted Loaded Tip) fueron diseñadas por la empresa española SISTEMAR en 1986. El propósito de su creación fue el de mejorar el rendimiento de las hélices convencionales para reducir el consumo de combustible, algo que se ha conseguido, con reducciones de hasta un 10% respecto a las hélices convencionales [18].

El funcionamiento de este tipo de hélices consiste en la colocación de unas placas de cierre en los extremos de las palas, situadas en las caras de presión de las mismas para conseguir una mayor sobre presión aguas abajo. Esto es debido a que está demostrado teóricamente que, a mayor diferencia de presiones en ambas caras, mayor es el rendimiento de la hélice. Además, las placas de cierre conseguirán también reducir las fuerzas fluctuantes de presión en los extremos de las palas, impidiendo así la formación de torbellinos, y reduciéndose también los niveles de ruidos y vibraciones a bordo.



Figura 2-9 Hélice CLT [19]

2.1.2.6 Propulsores azimutales (PODs)

Los propulsores azimutales (o azipodales) fueron inventados en la década de 1990 por la empresa ABB, la cual registró el primer propulsor de este tipo y es, en la actualidad, líder mundial en este tipo de propulsión. Los PODs consisten en una cápsula sumergida que contiene en su interior un motor eléctrico de velocidad variable conectado a un eje que transmite el movimiento a la hélice. A su vez, esta cápsula está conectada al barco mediante un eje vertical que le permite al POD rotar 360 grados, lo que evita el uso de un timón para maniobrar el barco [20].

Las ventajas que ofrece este tipo de propulsión son numerosas, a destacar la gran maniobrabilidad que confiere a los barcos, sumado a una respuesta inmediata al querer darle más potencia, una alta

velocidad de crucero y operaciones suaves y silenciosas. A destacar, por último, que en la actualidad se ha convertido en referente para la propulsión de modernos rompehielos y grandes cruceros; además de haber sido implementado en buques de guerra como el LHD Juan Carlos I, de la Armada Española.



Figura 2-10 Propulsor azipodal y LHD Juan Carlos I [20] [21]

2.1.2.7 Hélices contrarrotativas (CRP)

Las hélices contrarrotativas son un tipo de propulsor naval el cual se conoce desde 1836. Consisten en dos hélices situadas una a continuación de la primera, rotando ambas en sentido inverso. Este tipo de propulsión consigue recuperar el componente de velocidad rotacional de la hélice principal. Además, al tener dos hélices propulsoras en un mismo eje se reparte la potencia entre ambas, reduciendo así la carga que soporta cada una y permitiendo tener diámetros más pequeños. El que tengan hélices de tamaño menor a las convencionales hace que exista una mayor distancia entre la punta de la pala y el casco, con lo que se reducen la transmisión de ruidos y vibraciones al barco.

Tradicionalmente no se le dió mucha importancia a las hélices CRP, puesto que cuando surgieron existían muchos problemas de diseño con ejes largos, por lo que su empleo se ha visto reducido a torpedos y pequeñas embarcaciones rápidas. Sin embargo, en los últimos años con la mejora de la tecnología naval se ha conseguido solventar este problema, implementándose junto con la propulsión azimutal en cruceros grandes y rápidos, tipo ferry, para los cuales se ha conseguido aumentar el rendimiento (ligeramente en barcos monoeje), así como aumentar la maniobrabilidad del mismo, reducir las vibraciones a bordo, y disminuir el tamaño de las cámaras de máquinas debido a la menor carga soportada por el propulsor [22].

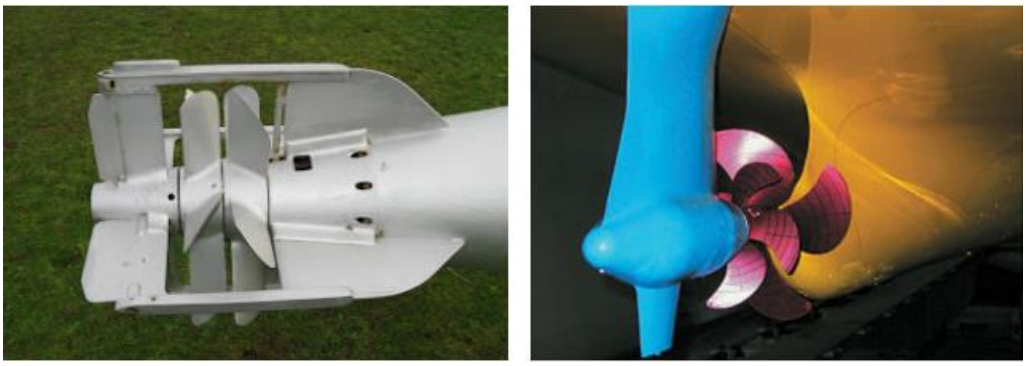


Figura 2-11 Hélice CRP de torpedo y combinación POD-CRP [22] [23]

2.1.2.8 Propulsores cicloidales

La idea de los propulsores cicloidales data de varios siglos atrás. El movimiento hidrodinámico que ejercen este tipo de propulsores se puede decir que tuvo su origen en el diseño de la rueda de paletas diseñada por Robert Hooke en 1681. Sin embargo, hasta dos siglos y medio mas tarde, a principios del siglo XX, no se empezarían a diseñar de una forma más parecida a la que conocemos hoy.

En un principio se fabricó un primer tipo de propulsor cicloidal denominado Kirsten-Boeing, el cual era bastante parecido al Voith-Schneider en geometría. Este propulsor está formado, al igual que el VSP por un conjunto de rueda de paletas articulada con álabes verticales de perfil hidrodinámico que permite el empuje de un buque en cualquier dirección sin que sea necesario el uso de timón ni variando la orientación del propulsor, como sucede en los propulsores azimutales.

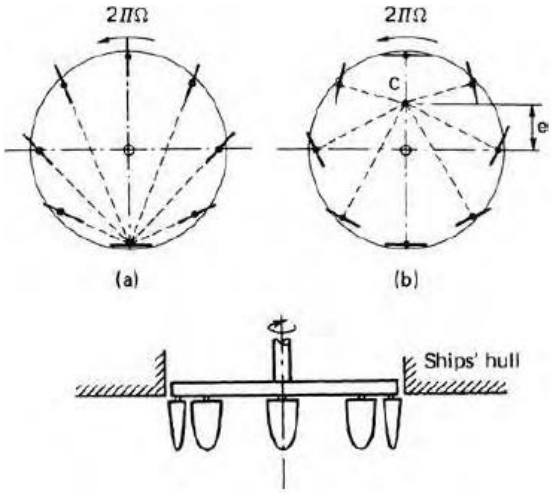


Figura 2-12 Geometría de movimiento de propulsores Kisten-Boeing y Voith-Schneider [24]

Como se puede apreciar en la Figura 2-12, mientras que el modelo de propulsor cicloidal de Kirsten-Boeing tiene fijo el centro de giro relativo en un punto de la circunferencia de rotación, el Voith-Schneider lo tiene en un punto intermedio. Los álabes del Kirsten-Boeing mantienen una posición de paralelismo respeto a la línea que les une con dicho centro, mientras que el VSP mantiene una relación de perpendicularidad. Por otro lado, estas geometrías también se ven reflejada en una gráfica donde se vea desplegada la trayectoria de un álabe superponiendo la traslación del propulsor a la rotación del álabe, siendo la trayectoria del VSP de tipo epicicloide y la del Kirsten-Boeing de tipo cicloide exacta [24].

Las ventajas de este tipo de propulsión son numerosas. Las principales residen en la gran maniobrabilidad que confieren a los buques, pudiendo cambiar la dirección de avance de un barco solamente con la variación del ángulo de ataque de las palas, sin necesidad por lo tanto de tener un timón, e incluso de poder cambiar de avanta a dar atrás si la variación de los álabes es la adecuada. Estas características lo hacen ideal para buques como remolcadores, y también para buques militares como son los cazaminas, puesto que el Voith-Schneider es una propulsión muy silenciosa.

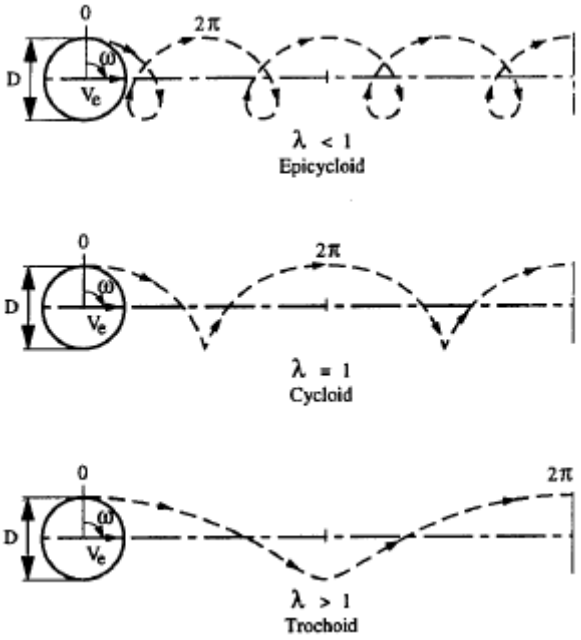


Figura 2-13 Trayectorias de diferentes propulsores cicloidales [24]

2.2 Características de propulsión e hidrodinámica del Voith-Schneider

El Voith-Schneider es un propulsor atípico en cuanto a su forma de operar se refiere. Tiene una serie de características cinemáticas e hidrodinámicas las cuales le hacen ser muy eficiente para determinadas plataformas. A continuación, se explicarán estas características.

2.2.1 Características cinemáticas [25]

En un VSP, los álabes están proyectados de forma vertical por debajo del casco, rotando por la acción de un motor y a la vez cada uno de ellos con su propio eje que les hará variar el ángulo de ataque según se quiera variar el empuje de una forma u otra. Esta oscilación de las palas está producida directamente por los enlaces conectados a la palanca de control, la cual puede ser desplazada excéntricamente del centro geométrico del rotor. El movimiento de la palanca de control está controlado por dos servomotores formando 90 grados entre ellos, uno para controlar el empuje longitudinal (avante y atrás) y otro para el transversal (babor y estribor).

Los enlaces entre los actuadores y los álabes variarán dependiendo del tipo de propulsor, además del tipo de transmisión de movimiento del motor al propulsor, principalmente por la potencia que tengan cada uno de los motores. Estos se simplifican básicamente en una sujeción del álabe a la palanca de control, con más o menos elementos intermedios dependiendo de la complejidad del motor. Por otra parte, la transmisión de potencia también varía, siendo por engranajes cónicos el caso general para barcos, o por elementos más básicos y menos resistentes como en el caso del modelo de VSP seleccionado para realizar este TFG.

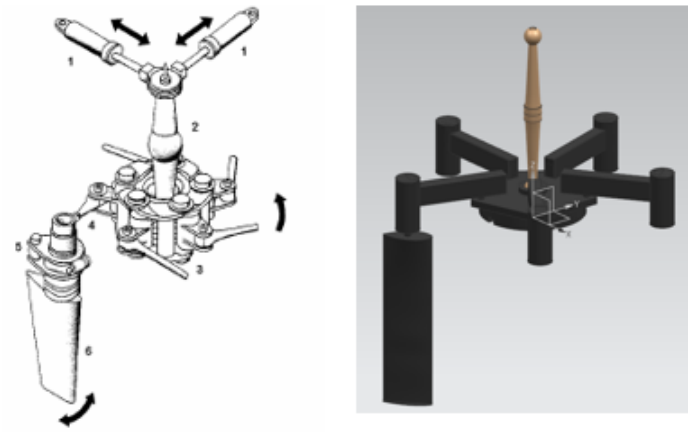


Figura 2-14 Enlaces álabe-palanca de control de buque genérico y modelo escogido [25]

La denominación de propulsión cicloidal viene dada por la trayectoria que sigue un álabe al rotar 360 grados en conjunto con el avance que recorre en ese tiempo. Si se coge un álabe de forma aislada y se superpone el movimiento de rotación y de traslación se verá como se forma una cicloide. Para que haya empuje y el consiguiente avance, el perfil del álabe debe estar en un ángulo tal que no siga la línea de la cicloide, consiguiendo así una oposición contra el flujo de agua y generando el empuje. La variación del ángulo de ataque se produce por la acción de la palanca de control sobre los enlaces a cada una de las palas, como ya se ha explicado anteriormente.

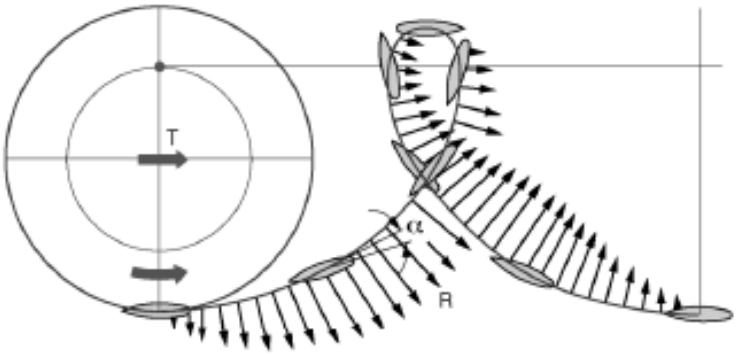


Figura 2-15 Trayectoria cicloidal [25]

El principio cinemático para el movimiento característico de los álabes en estos propulsores consiste en una rotación de centro real el centro del rotor del VSP, pero centro instantáneo aquel definido por la posición de la palanca de control. Como se puede observar en la Figura 2-14, el centro instáneo de rotación, N, hace que los álabes mantengan una posición relativa con él de perpendicularidad con la línea que los une. Es el movimiento rotatorio respecto al centro O, forzado por la carcasa del propulsor, lo que hace que cuando los álabes se encuentran en la posición más cercana a N se produzca un aumento de la velocidad relativa a N para mantener la perpendicularidad respecto de él, y aparezca el 'repaleo' que produce el avance en la dirección indicada.

La magnitud del empuje dependerá del ángulo de ataque, α, de la pala. Este empuje varía durante el recorrido del álabe, si lo integramos en toda su trayectoria cicloidal veremos que el sumatorio de los empujes en cada posición para cada momento de la rotación dan como resultante el empuje en la dirección de avance para las componentes que tengan esa dirección, cancelándose las componentes que actúan de forma transversal a la dirección deseada de avance. Como resultado de lo explicado, se puede concluir que el avance del barco puede realizarse en cualquier dirección y sentido con solo variar la

palanca de control, haciendo que se puedan alcanzar mismos empujes con menores potencias y que se pueda invertir el sentido del avance sin tener que variar el sentido de rotación del motor.

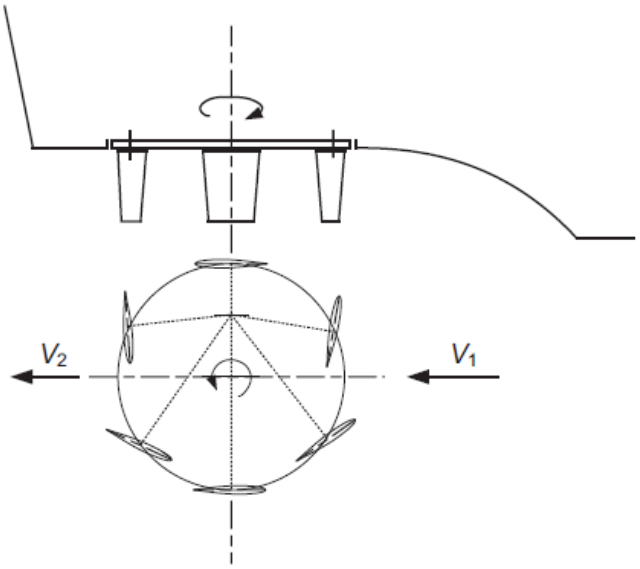


Figura 2-16 Principio de funcionamiento del VSP [26]

Estas características del movimiento se explican con una serie de ecuaciones geométricas para representar datos tales como la excentricidad de la rotación, el coeficiente de avance o la velocidad de los álabes. Primeramente, se puede definir la excentricidad, e, como:

$$e = \frac{2 \cdot ON}{D}$$

Donde ON es el segmento que une el centro O del rotor con el centro N de rotación instantánea de los álabes y D es el diámetro del rotor. Por otra parte, tenemos la ecuación del coeficiente de avance del propulsor, λ, que es definida como la velocidad del flujo de entrada al VSP entre la velocidad radial de los álabes.

$$\lambda = \frac{V_A}{u}$$

Siendo definida la velocidad radial de los álabes como la velocidad de rotación del rotor, n, por el diámetro de la carcasa, por el número π.

$$u = \pi n D$$

El movimiento que realiza cada álabe del Voith-Schneider visto por un observador externo se ha descrito anteriormente como una trayectoria cicloidal. Una vez definidas las variables de excentricidad, coeficiente de avance y velocidad de rotación del rotor, podemos caracterizar esa trayectoria definiendo el radio cicloidal como $\lambda \cdot$ D/2. Por lo tanto, en una revolución el propulsor recorrerá la distancia de ($\lambda \cdot$ D/2) π en la dirección del avance, aunque habrá continuas variaciones en el mismo por el flujo entrante de agua a través del propulsor.

2.2.2 Características hidrodinámicas [27]

Las características hidrodinámicas del VSP están representadas como coeficientes adimensiales, los cuales se han demostrado experimentalmente que son diferentes a los que caracterizan un propulsor de hélice convencional. Las ecuaciones que definen a un propulsor Voith-Schneider son las siguientes:

Empuje	$T = \sum L_i$
Par de torsión	$M = \sum D_i$
Coeficiente de empuje	$K_S = \frac{T}{0.5\rho DLV^2}$
Coeficiente de par de torsión	$K_D = \frac{4M}{\rho D^2 LV}$
Rendimiento en aguas libres	$\eta_0 = \lambda \frac{K_S}{K_D}$

siendo D el diámetro del rotor, ρ la densidad del agua, L la longitud del álabe y λ el coeficiente de avance. El número de Reynolds para los VSP, basado en la longitud c del perfil de un álabe, se define como:

$$Re = \frac{c}{\nu}\sqrt{V_A^2 + u^2}$$

donde ν es la viscosidad cinemática del fluido. Todas las propiedades hidrodinámicas de los VSP están influidas principalmente por los siguientes parámetros:

- Ángulo de ataque de los álabes.
- Geometría del perfil del álabe.
- Relación longitud del perfil al diámetro del rotor (c/D).
- Grosor del perfil del álabe.
- Posición del álabe.
- Relación entre la longitud del álabe y el diámetro del rotor (L/D).
- Forma y trazado del álabe.
- Diseño del extremo del álabe.

El coeficiente de empuje y el rendimiento son función del coeficiente de avance, λ, y la excentricidad. En contraposición, hay una variación cualitativa en los coeficientes si los comparamos con los propulsores de hélice de paso variable, con los cuales mantiene valores parecidos. Además, a menor número de palas en el VSP, mayor eficiencia. En los propulsores actuales, sin embargo, el número de palas es mucho menos importante debido a que la modificación del ángulo de curvatura en los álabes reduce las interacciones entre las palas de proa y las de popa. El empuje lateral generado en un propulsor aumenta a medida que se incremente el coeficiente de avance. Al aumentar el avance manteniéndose la velocidad de rotación del rotor, se puede concluir que además aumentarán las fuerzas actuando sobre los álabes, así como los pares de torsión.

3 CREACIÓN DEL MODELO CAD

En este capítulo se explicará la creación del modelo CAD en 3D del motor Voith-Schneider que se ha tomado para el trabajo. Se abordarán tanto los procesos de toma de datos y su diseño como el ensamblado de todas las partes. Para esta parte del trabajo se ha trabajado con el programa Siemens NX.

3.1 Representación gráfica en 3D

3.1.1 Intrumentos de medida

Para la toma de medidas del modelo se ha utilizado un pie de rey como instrumento principal.

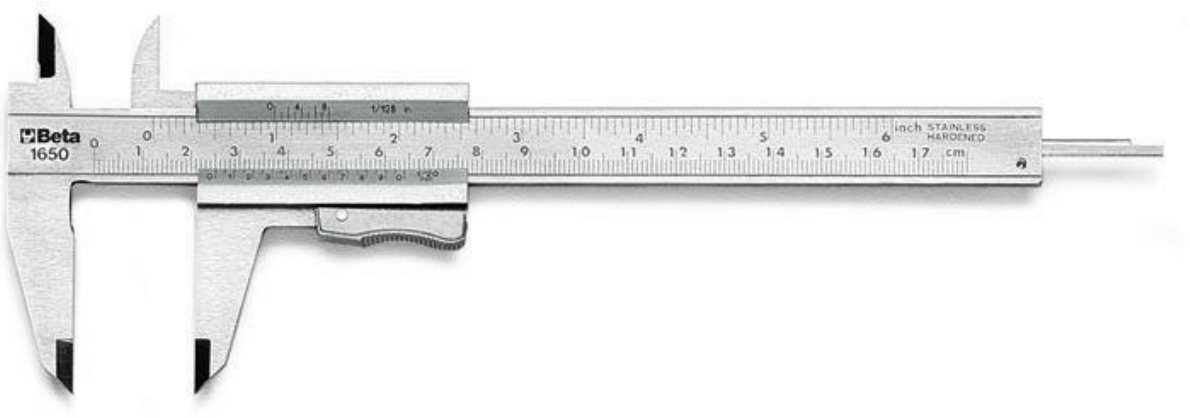


Figura 3-1 Pie de rey [28]

3.1.2 Partes del modelo

Para la representación del motor Voith-Schneider, se ha decidido dividir el mismo en diferentes partes para su posterior ensamblaje. Estas partes son: álabes, soporte principal, círculo guía, soporte pentagonal, sujeción de álabe, tapa de soporte, palanca de control, tapa inferior, tapa superior, sujeción de motor y motor.

3.1.3 Álabes

Para la representación de los álabes se ha considerado un perfil de tipo NACA 0012, de acuerdo a la forma de los mismos en el modelo real. El método empleado para el diseño de este perfil ha sido la inserción de 'splines' en Siemens NX por las coordenadas de las curvas. Estas coordenadas han sido sacadas de un generador de perfiles normalizados para turbinas de la página airfoils [29].

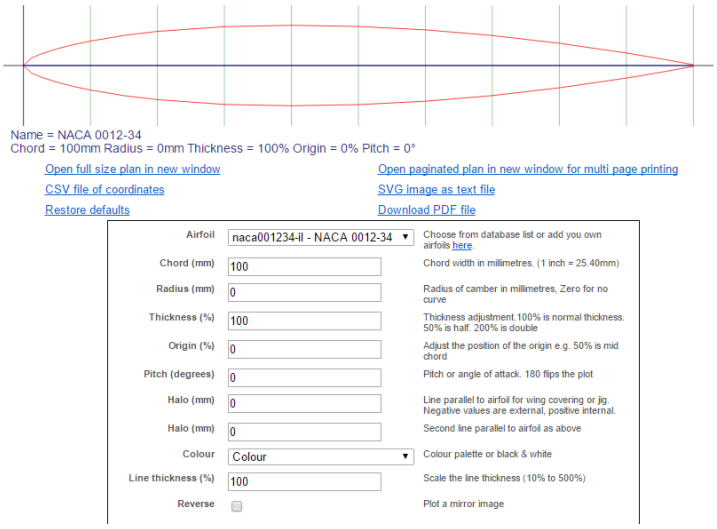


Figura 3-2 Generador de perfiles [29]

Una vez generado el perfil con las dimensiones que se requieren, se exportan las coordenadas de la curva en un archivo CSV y se guardan como archivo de datos (.dat), introduciéndole además la coordenada Z de elevación en el plano que se desea, puesto que el generador de perfiles solo se nos dan las coordenadas en 2D.

cross sec00: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
14.000000       0.033600        0
13.300000       0.287560        0
12.600000       0.522760        0
11.200000       0.929600        0
9.800000        1.254400        0
8.400000        1.489600        0
7.000000        1.631560        0
5.600000        1.680000        0
4.200000        1.624000        0
2.800000        1.426040        0
2.100000        1.258040        0
1.400000        1.022840        0
1.050000        0.877240        0
0.700000        0.698040        0
0.350000        0.470400        0
0.175000        0.317240        0
0.000000        0.000000        0
0.175000        -0.317240       0
0.350000        -0.470400       0
0.700000        -0.698040       0
1.050000        -0.877240       0
1.400000        -1.022840       0
2.100000        -1.258040       0
2.800000        -1.426040       0
4.200000        -1.624000       0
5.600000        -1.680000       0
7.000000        -1.631560       0
8.400000        -1.489600       0
9.800000        -1.254400       0
11.200000       -0.929600       0
12.600000       -0.522760       0
13.300000       -0.287560       0
14.000000       -0.033600       0
```

Figura 3-3 Archivo de coordenadas de una spline del perfil del álabe

Una vez realizada la exportación de las coordenadas, dentro del programa Siemens NX se introducen los datos mediante el comando “splines (será cancelado)” con el modo por “puntos pasantes”. Una vez hecho esto, se insertan los puntos desde el archivo de datos que previamente hemos guardado y se dibuja la sección de perfil que queremos.

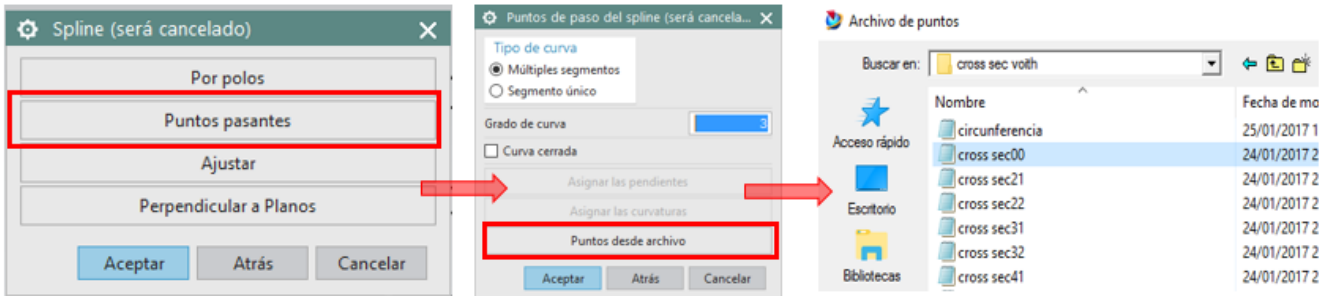


Figura 3-4 Importación de coordenadas y trazado de splines

Para el álabe del modelo que tenemos se han realizado 9 secciones diferentes para diseñarlo lo más fielmente posible a la realidad, tomando medidas en cada una de las secciones del modelo real.

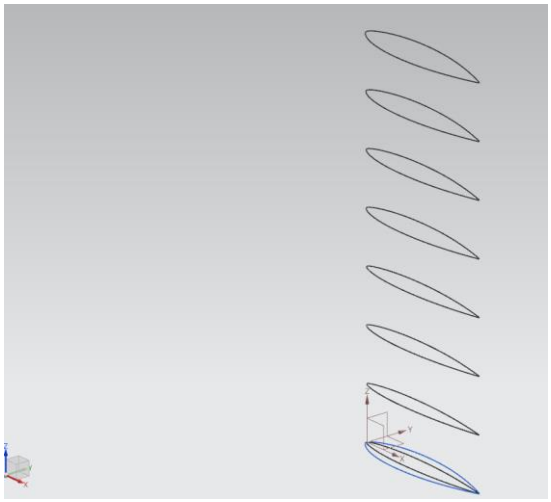


Figura 3-5 Secciones del perfil representadas

Una vez representadas, se realiza un barrido de curvas de paso para que el perfil quede definido. Para finalizar se realiza una extrusión en la parte inferior del álabe de mayor grosor que completa la representación del mismo de manera más exacta y otra extrusión en la parte superior que será la inserción del álabe en el soporte.

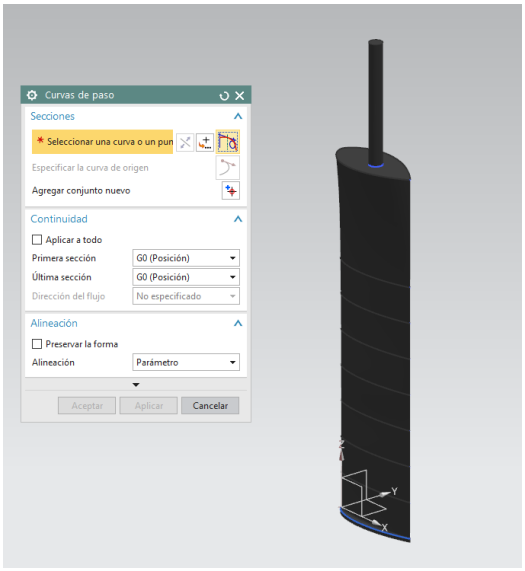


Figura 3-6 Representación final de álabe

3.1.4 Soporte principal

Se ha denominado soporte a la estructura a la que estarán unidos los álabes y que transmitirá el giro circular del motor al conjunto de los cinco álabes, además de servir de soporte a los elementos que transmitirán el movimiento circular excéntrico de movimiento del ángulo de los álabes.

Primeramente, se ha dibujado un croquis de la estructura principal para extruirlas por revolución. Una vez conseguido esto, se han realizado dos extrusiones, una que servirá como raíl para el círculo guía y otra de cinco salientes cilíndricos correspondientes a las inserciones de los tornillos de fijación de la tapa del soporte al mismo.

Por último, se han realizado agujeros en los salientes cilíndricos de fijación y otros correspondientes a las inserciones de los cinco álabes en el soporte.

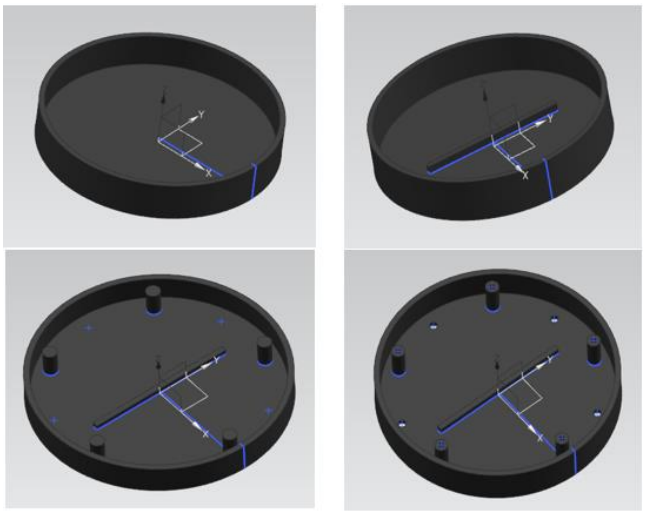


Figura 3-7 Proceso de diseño del soporte

3.1.5 Círculo guía

El círculo guía es una de las dos partes encargadas de transmitir el movimiento de la varilla de control a los álabes para controlar los ángulos de ataque. Para su diseño se he extruido un círculo con las dimensiones correspondientes al diseño real, y posteriormente se le han recortado dos raíles en caras opuestas y perpendiculares entre sí, uno para movimiento del círculo con el soporte y otro para guiar el soporte pentagonal que irá apoyado sobre él.

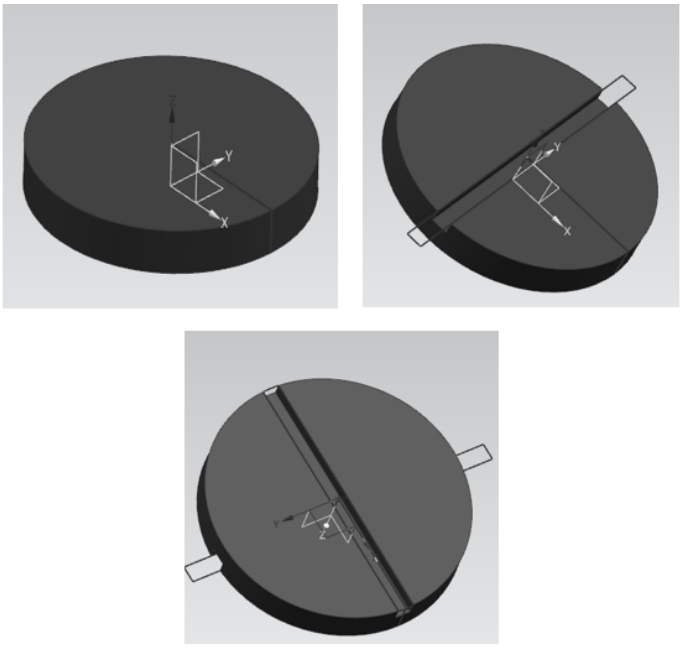


Figura 3-8 Proceso de diseño del círculo guía

3.1.6 Soporte pentagonal

Esta pieza resulta fundamental junto con el círculo guía para la transmisión del movimiento de la palanca de control a los álabes. Para su diseño se ha realizado un croquis de las dimensiones del pentágono en cuestión, extruyéndolo luego junto con los cinco salientes cilíndricos que ayudarán a la fijación de cada uno de los álabes.

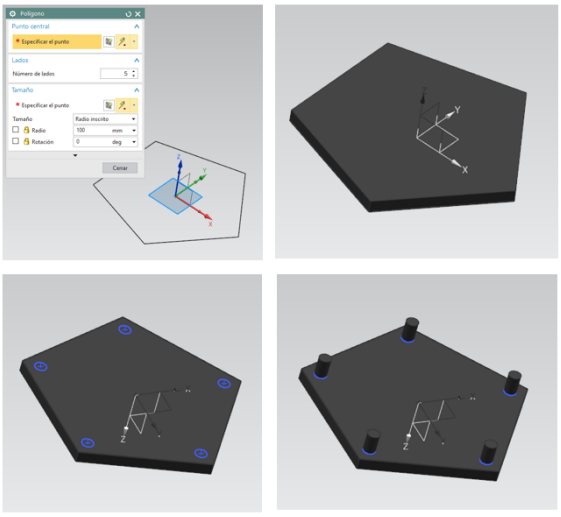


Figura 3-9 Diseño y extrusión de pentágono y salientes de fijación de álabes

Posteriormente, se ha realizado una extrusión exterior y un agujero en el centro del pentágono que servirá como punto de apoyo para la varilla de control. Por último, se ha extruido el saliente que irá insertado dentro del raíl del círculo guía para conseguir el movimiento que queremos del mismo.

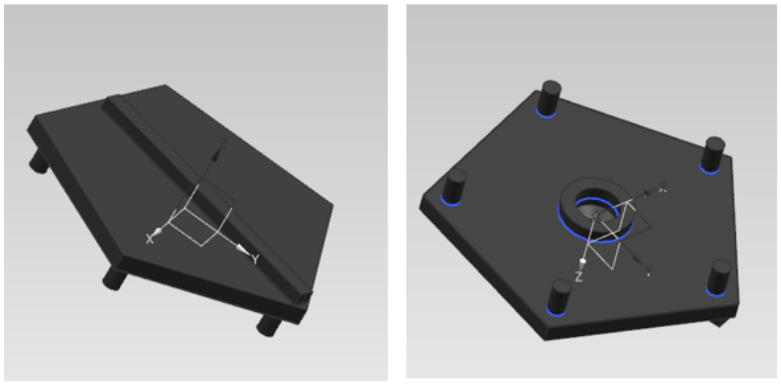


Figura 3-10 Extrusiones de raíl guía y apoyo para palanca de control

3.1.7 Sujeción de álabe

La sujeción álabe-soporte pentagonal es una de las piezas más importantes, puesto que sin ella no existiría sujeción entre álabe y el soporte principal, ni tampoco se podría modificar el ángulo de ataque de los álabes.

Para el diseño de las cinco sujeciones se ha realizado primero un croquis de las dos partes principales que componen la sujeción: la parte cilíndrica que une álabe y soporte principal, y la parte prismática que une álabe y soporte pentagonal. Una vez realizado el croquis se extruyen las dos piezas y se unen la una a la otra.

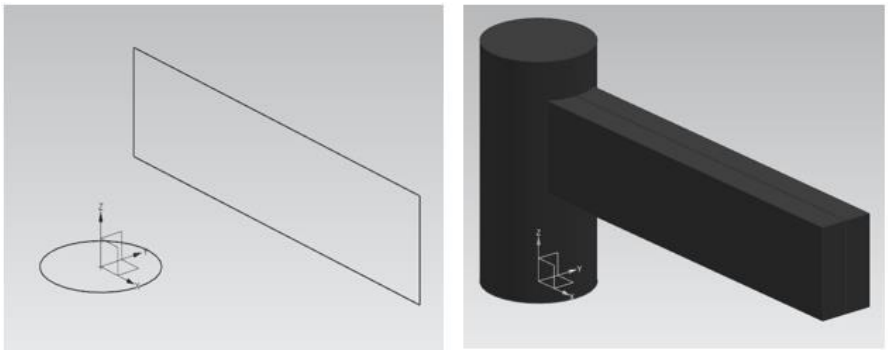


Figura 3-11 Croquis y extrusión de partes principales de la sujeción de álabe

Una vez extruidas y unidas las dos piezas principales, se procede a la realización de las cavidades cilíndricas, correspondientes a la inserción de la parte superior del álabe; y prismática, correspondiente a la parte que irá a la sujeción pentagonal.

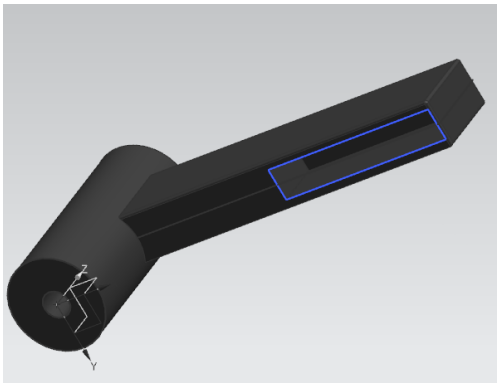


Figura 3-12 Inserciones de sujeción de álabe

Por último, se realizan inserciones y redondeos de carácter estético para asemejar más la pieza a su homóloga real.

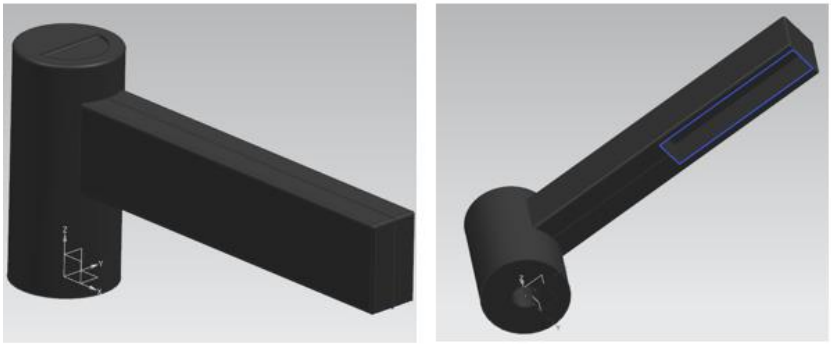


Figura 3-13 Aspecto final de sujeción de álabe

3.1.8 Tapa de soporte

Este elemento es el que cierra al soporte principal, además de servir de apoyo a la palanca de control. En su diseño se ha partido de un croquis de la pieza principal, la cual se ha extruido por revolución. Posteriormente se han realizado extrusionados de los refuerzos transversales que posee la tapa en su base con la ayuda de varios planos que cortan a la pieza en los lugares donde se encuentran dichos refuerzos.

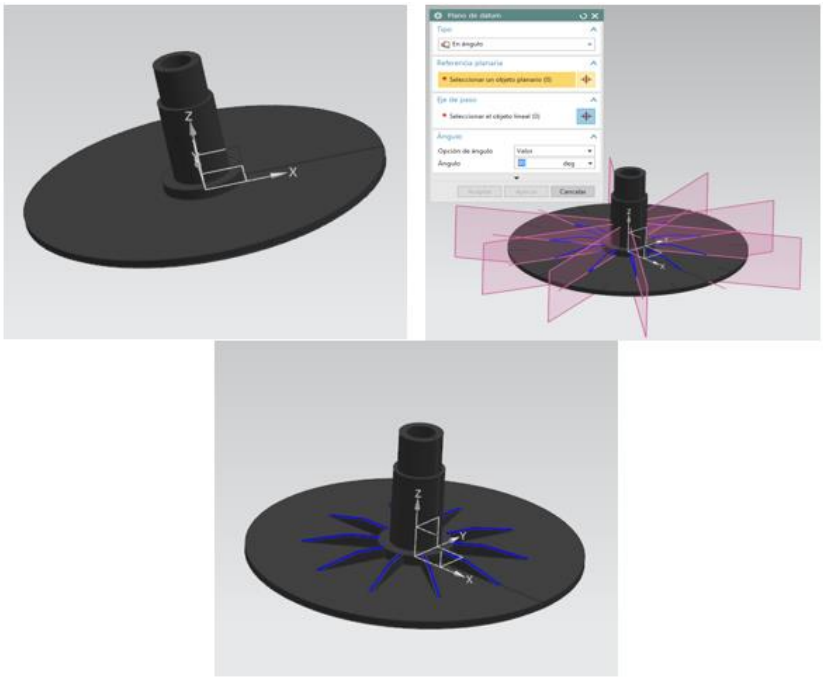


Figura 3-14 Proceso de extrusionado de los refuerzos de la tapa de soporte

A continuación, se realizan 10 agujeros en la base de la pieza para la inserción de la parte superior de las sujeciones de los álabes y para los tornillos de fijación de la tapa al soporte. Conforme a la pieza real, además, se practican extrusionados en la parte inferior de la base en la zona de inserciones y de los agujeros destinados a los tornillos de fijación.

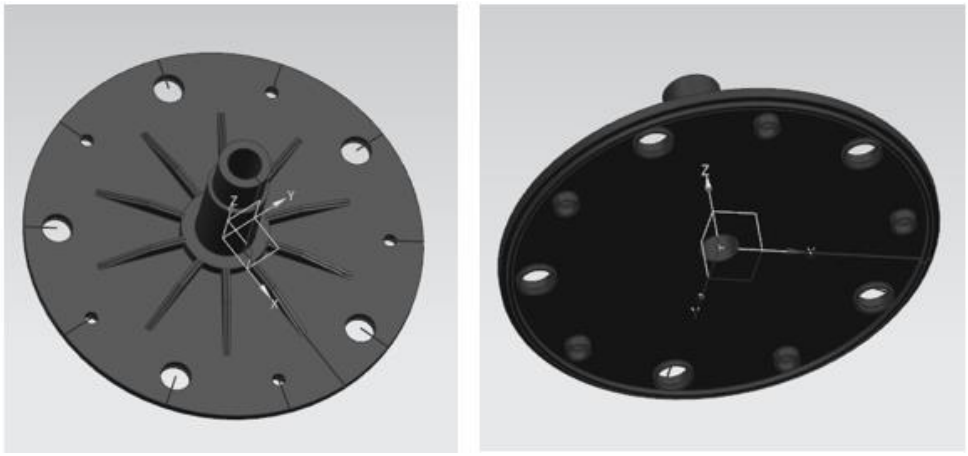


Figura 3-15 Realización de agujeros y extrusionado de salientes

Por último, se ha realizado una extrusión en el centro del saliente cilíndrico a fin de servir de apoyo a la palanca de control cuando se realice el ensamblaje, tal y como se encuentra en la pieza real.

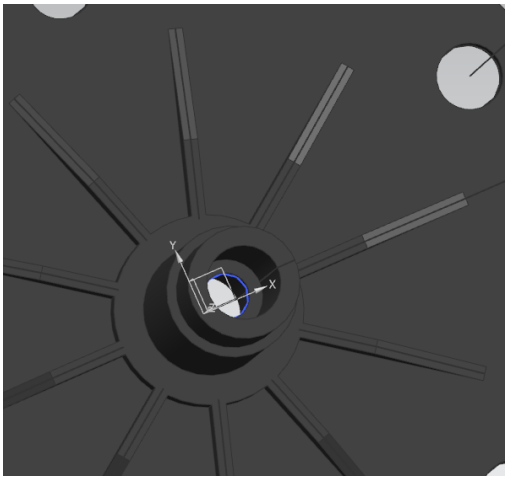


Figura 3-16 Estrechamiento interior

3.1.9 Palanca de control

Esta pieza es una de las fundamentales en el funcionamiento del cambio de ángulo de ataque de los álabes. Se ha realizado mediante un croquis de circuferencias concéntricas realizadas a diferentes alturas, variando la dimensión de los diámetros. Estas circunferencias se han unido posteriormente mediante el método de curvas de paso, el mismo método utilizado para representar los álabes.

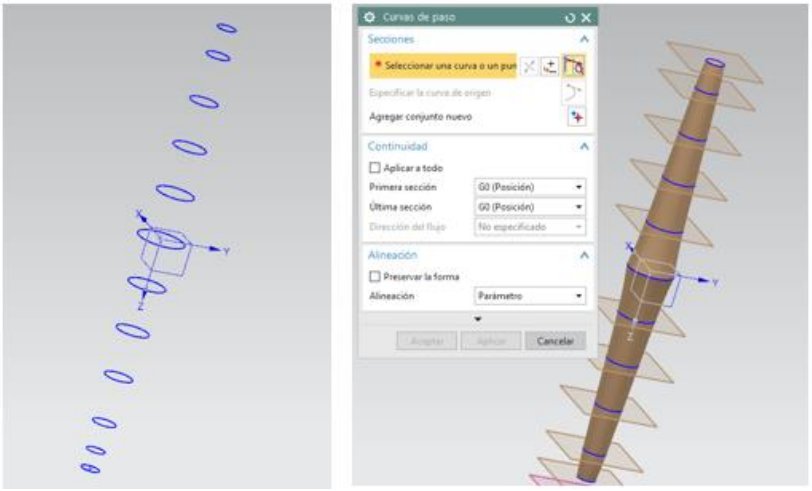


Figura 3-17 Diseño de pieza principal de la palanca de control

Una vez realizada la pieza principal se insertaron dos esferas en cada uno de los extremos de la varilla, las cuales servirán para insertarse en el centro del soporte pentagonal, así como para guiar el movimiento requerido de los álabes en cada momento. Además, se extrusiona una forma prismática transversal en el centro de la palanca, la cual tiene la función de hacer contacto con el estrechamiento interior de la tapa de soporte.

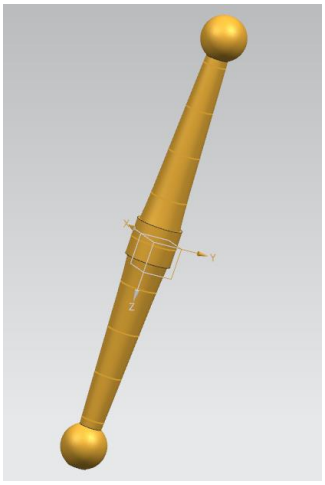


Figura 3-18 Vista final de la palanca de control

3.1.10 Tapa inferior

La tapa inferior es el elemento que no rota en conjunto con el resto de la pieza. Es el soporte del motor y de la sujeción del mismo. Para diseñarlo se ha extruido por revolución la pieza principal, y posteriormente se le han añadido los refuerzos transversales, por el mismo método empleado en la tapa del soporte.

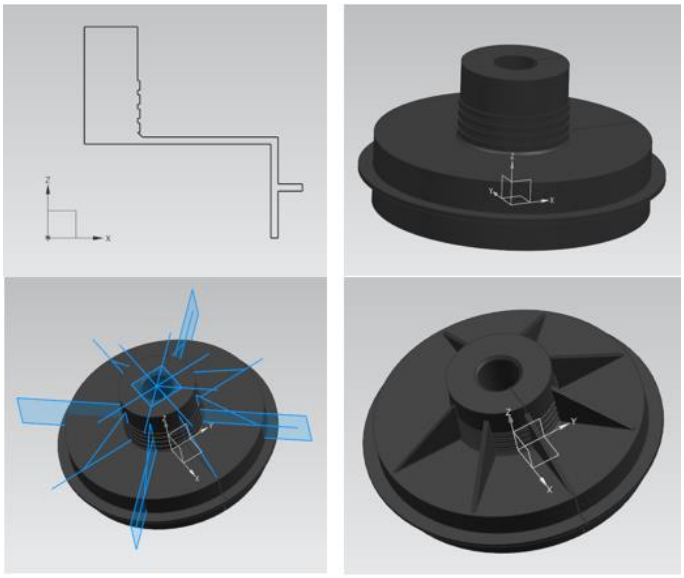


Figura 3-19 Proceso de extrusionado de pieza principal y sus refuerzos

A continuación, se realizan dos extrusiones en la zona mas ancha entre entre refuerzos laterales, de forma cilíndrica situados cada uno sobre 3 extrusiones de forma prismática. Estas dos extrusiones cilíndricas tendrán un agujero en sus centros y servirán para la sujeción del soporte del motor.

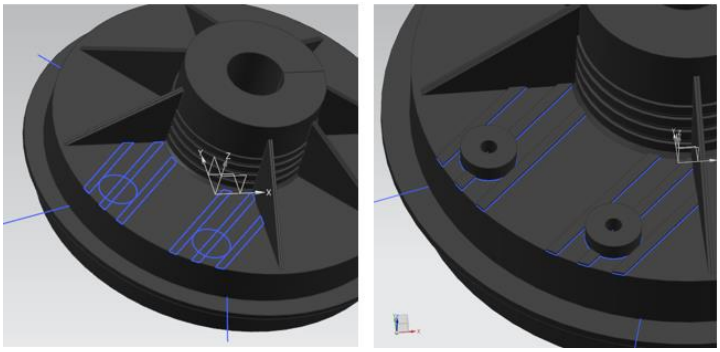


Figura 3-20 Extrusión de apoyo para el soporte del motor

Por último, se realizan redondeos y chaflanes de acuerdo a la pieza real para asejemar el modelo más a la realidad.

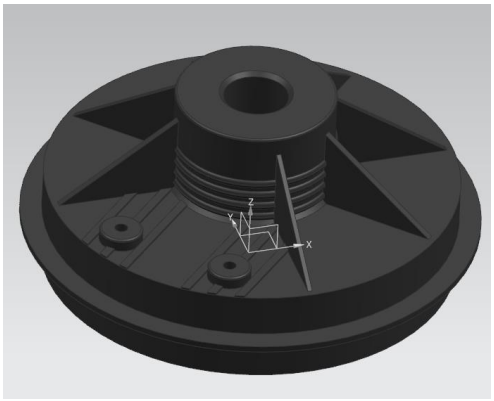


Figura 3-21 Diseño final de tapa inferior

3.1.11 Tapa superior

Esta parte es la que recibe el movimiento rotatorio del motor por medio de la correa y lo transmite al resto de las piezas del propulsor, a excepción de la tapa inferior. Como en la tapa inferior, para su diseño se ha partido de una extrusión por revolución a partir de un croquis con las partes principales.

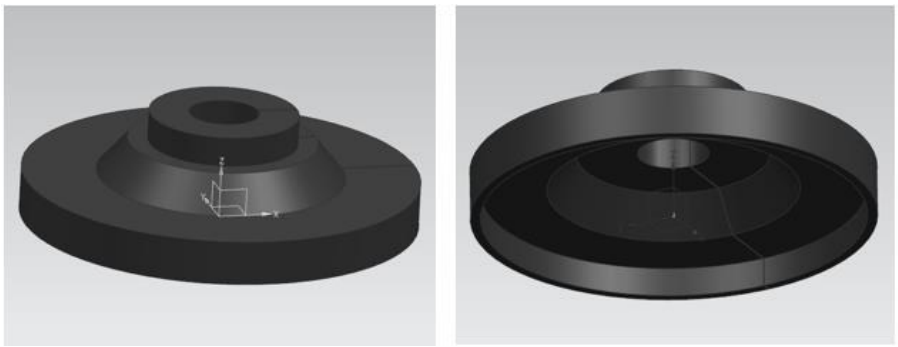


Figura 3-22 Extrusión por revolución. Tapa superior

Una vez realizada la primera extrusión, se crean las extrusiones de los refuerzos transversales mediante inseciones de planos para dibujar los croquis. Una vez extrusionados, se realizan 8 agujeros

simétricos en la base de la pieza con la finalidad de poder acceder a los tornillos que unen la sujeción del motor con la tapa inferior.

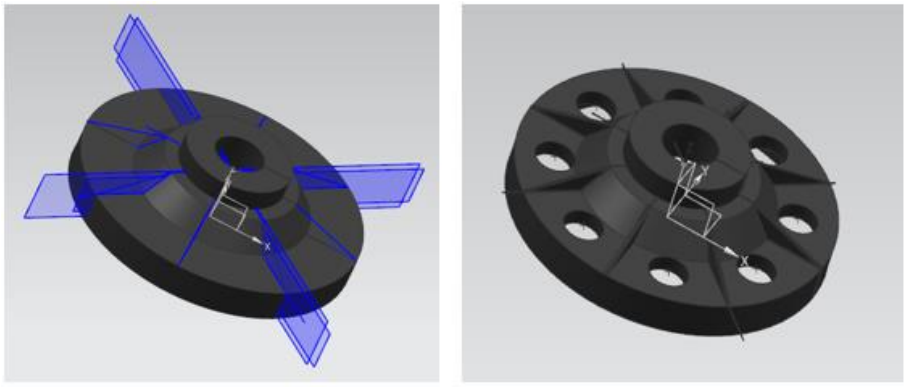


Figura 3-23 Planos de corte para refuerzos transversales y representación final

3.1.12 Sujeción de motor

La sujeción del motor se trata de una pieza cuya función principal es la de dar soporte al motor del propulsor, yendo sujeta a la tapa inferior del propulsor. Se empieza diseñando la forma principal de la sujeción, la cual consiste en un semicírculo y un prisma unidos.

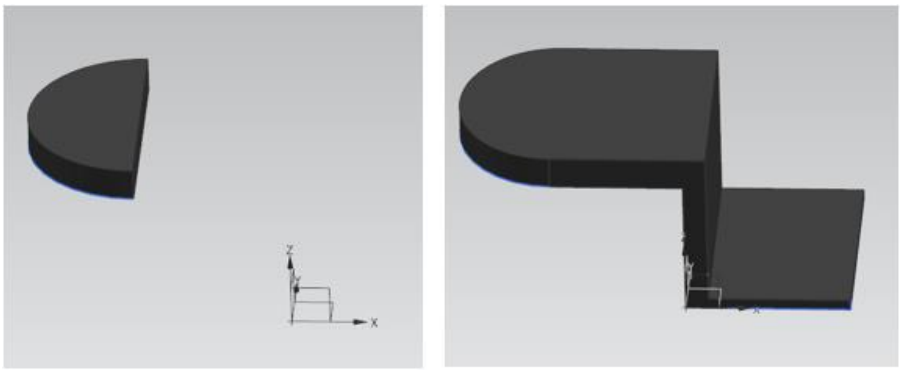


Figura 3-24 Diseño de la forma base. Sujeción de motor

A continuación, se recortan del cuerpo una curva en la pared vertical del soporte y otra en el extremo recto de la pieza, además de recortar las esquinas del mismo extremo. Después se extrusionan los dos salientes cilíndricos que encajarán en sus homólogos de la tapa inferior, huecos en su parte inferior.

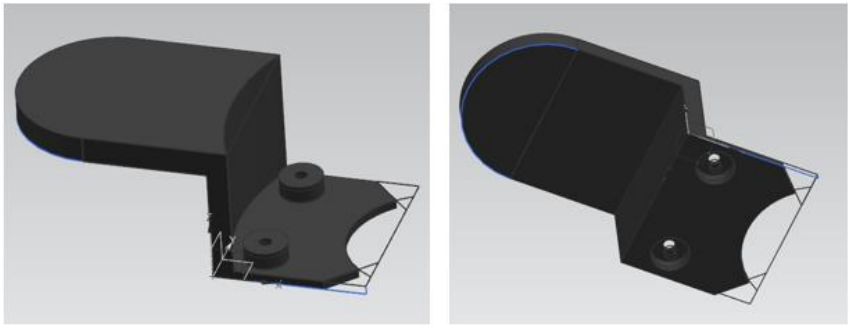


Figura 3-25 Recortes del cuerpo y extrusión de salientes.

Después de haber realizado los salientes y recortes, se procede a un vaciado parcial de la parte inferior de la cara superior del diseño. Posteriormente dará lugar una extrusión de los refuerzos de la sujeción, los cuáles están situados a ambos lados de la cara vertical de la pieza.

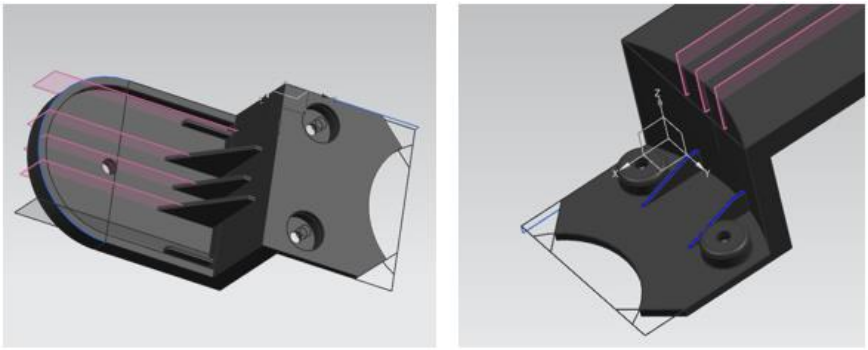


Figura 3-26 Extrusiones de los refuerzos

Para finalizar, se extrusiona una pequeña plataforma de apoyo para el motor, con un agujero en el centro de la misma para que pase el eje del motor.

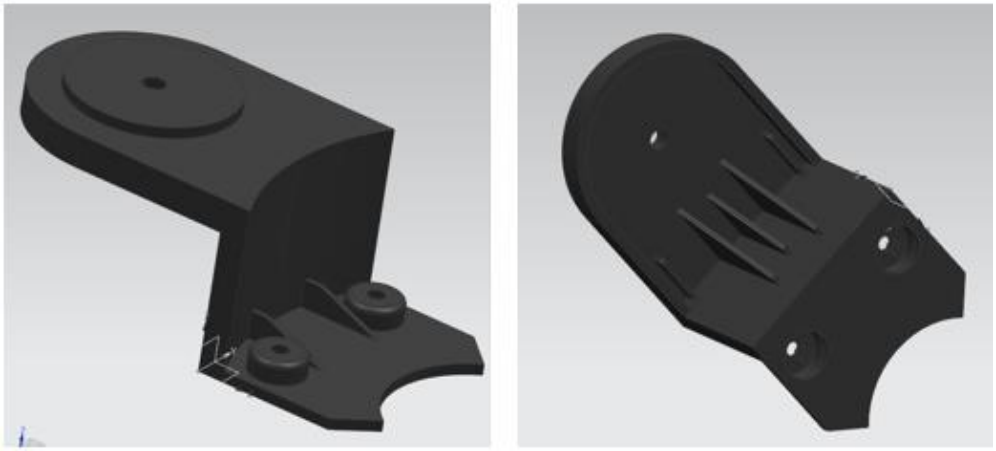


Figura 3-27 Vista final de sujeción de motor

3.1.13 Motor

El motor es la pieza del propulsor que le proporciona a todo el conjunto la velocidad de rotación, va fijado al resto del propulsor por medio de la sujeción del motor, y esta a su vez va fijada a la tapa inferior. Su diseño es bastante sencillo, puesto que solo se compone de un croquis extrusionado por revolución que representa el motor y su eje vertical que atraviesa la sujeción.

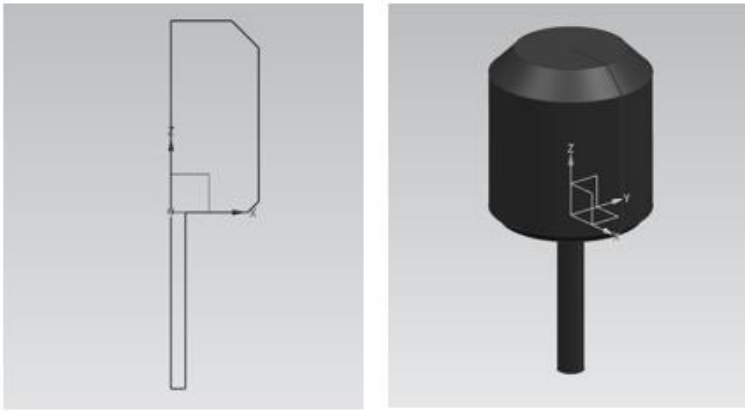


Figura 3-28 Diseño y extrusión de motor

3.2 Ensamblado de piezas

Se va a proceder a explicar el ensamblado de las diferentes piezas descritas en el apartado 3.1 para formar el propulsor completo. El orden de ensamblado que se sigue es de niveles inferiores (álabes, soporte de álabes, soporte pentagonal, sujeción de álabes y círculo guía) a niveles superiores (todas las diferentes tapas, el motor y su sujeción).

3.2.1 Soporte ensamblado

Esta parte del ensamble es la más importante del propulsor, puesto que será la que recoja el movimiento de los álabes y la que se utilizará posteriormente para el análisis cinemático de los mismos. Para el ensamble se ha procedido primeramente con la colocación del soporte principal en el origen de coordenadas, a fin de que todo el montaje este centrado sobre el mismo eje. Los álabes para su colocación se han restringido los cinco a tener el mismo eje o línea central que cada uno de los agujeros por los que se van a insertar al soporte, y posteriormente se han unido a él.

Una vez fijados los álabes en su posición, se ensambla el círculo guía centrado en el raíl por el que tiene que moverse y se apoya en la base del soporte. De la misma manera, el soporte pentagonal se alinea sobre el raíl que posee el círculo guía en su cara superior y restringe de manera que lo toque. Por último, se ensamblan las cinco sujeciones de los álabes al soporte pentagonal. Se realizan las restricciones de manera que estén alineados los centros con la inserción del álabe y que su hueco en la parte prismática toque por el interior a uno de los salientes del soporte pentagonal. De esta manera, se consigue que al moverse el centro del soporte pentagonal tenga el movimiento circular excéntrico característico de los propulsores cicloidales y al estar en contacto la sujeción del álabe con el pentágono, se consiga transmitir el movimiento de cambio de ángulo a los álabes para cada posición diferente del centro del soporte pentagonal.

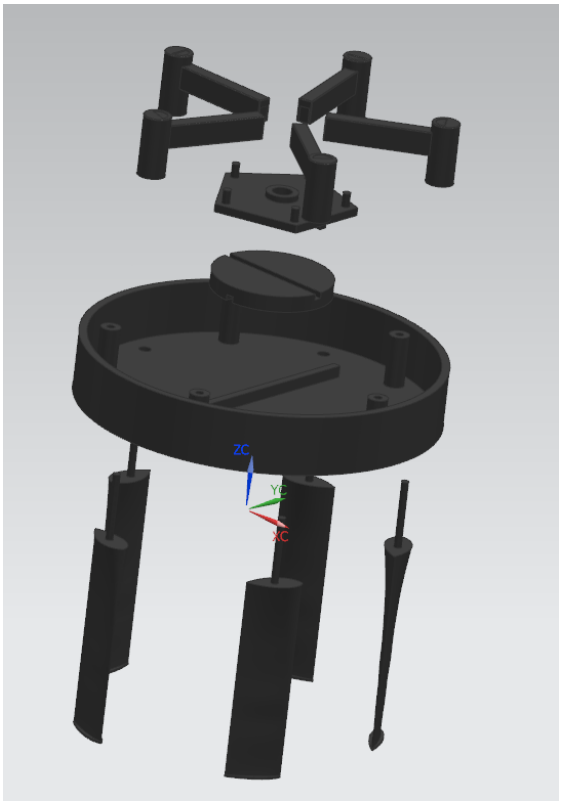


Figura 3-29 Explosionado del ensamblaje de soporte

3.2.2 Ensamblaje completo

Una vez realizado el ensamblaje del soporte, se procede a incluir en él al resto de componentes que forman el propulsor. Primero se agrega la tapa del soporte, alineando cada uno de los agujeros de la misma a su correspondiente saliente en el soporte, después se restringen ambos componentes para que se toquen. Una vez realizado el ensamble de la tapa, se agregará la palanca de control, la cual irá centrada en el hueco central de la tapa del soporte, tocando el estrechamiento que se encuentra en su sección media, y apoyada en el hueco circular del soporte pentagonal, de forma que se transmita el movimiento de la palanca al mismo.

Después de finalizar con la palanca de control, se procede a agregar las tapas inferior y superior. La inferior cuenta con la peculiaridad de que es fija, puesto que permanece quieta junto con la sujeción del motor, mientras que el resto de componentes tendrán un giro a la velocidad de rotación del motor, transmitido por la correa. Únicamente se centra la tapa inferior con el eje de la tapa del soporte, y se toca (sin restringir ningún movimiento) con la parte superior de los refuerzos de la tapa del soporte. La sujeción del motor se ensamblará a la tapa inferior por los dos salientes que tiene esta en un lateral, de forma que se hagan fijos, y una vez fijada la sujeción se agregará el motor centrado en la inserción de la misma para que el motor este tocando la cara superior de la sujeción, con su eje atravesándola.

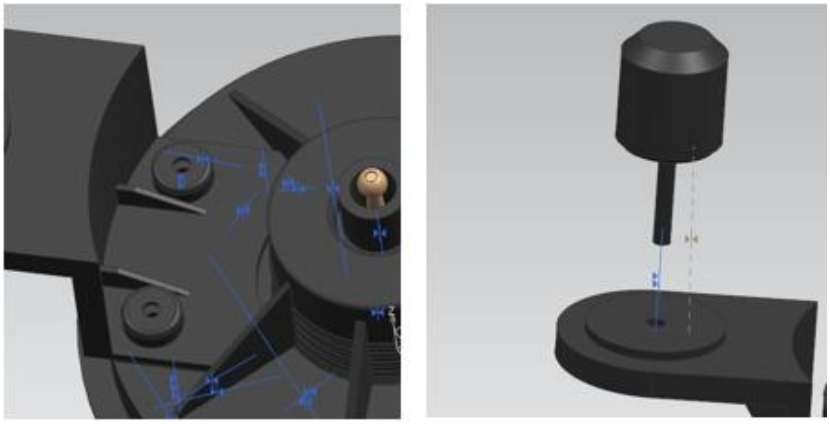


Figura 3-30 Detalle de sujeción motor con tapa inferior e inserción motor-sujeción

Por último, la tapa superior se centra igualmente con el eje de la tapa del soporte y se hace contacto con la parte superior de la misma, de forma que cuando la correa le transmita el movimiento del motor, esta se lo trasmita al resto de componentes del ensamble a excepción de la tapa inferior.

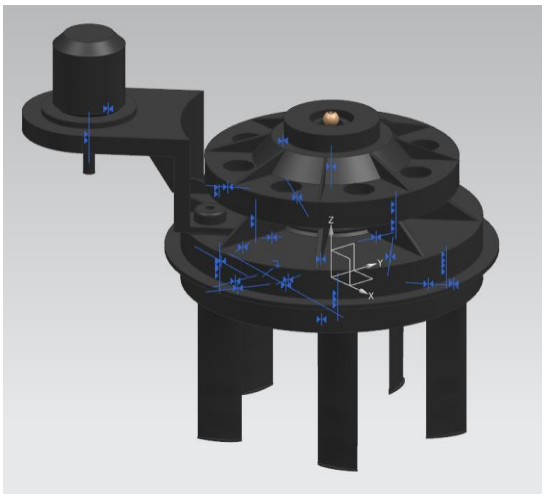


Figura 3-31 Vista general del ensamble completado

4 SIMULACIONES

En este apartado se van a describir los procesos de simulación cinemática e hidrodinámica que se han realizado en el modelo de VSP para poder analizar su movimiento y las fuerzas que actúan sobre él en su funcionamiento.

4.1 Simulación cinemática [30]

Se va a proceder a detallar la simulación cinemática del modelo diseñado en 3D, explicando como son las características de su movimiento y como se han realizado las diferentes acciones con el software de simulación cinemática de Siemens NX para que el modelo realice los movimientos necesarios para su posterior importación al simulador hidrodinámico.

El movimiento que sigue un propulsor Voith-Schneider es muy particular, en comparación con el resto de propulsores modernos. Su cinemática se basa en una rotación principal centrada en el rotor, que le da la velocidad de rotación del motor y, además, una rotación relativa a un punto excéntrico al eje central del rotor definida por la palanca de control, que será la que le dé al propulsor un determinado paso a las palas y sentido al movimiento.

Para empezar con la configuración de la simulación, en el archivo CAD que hemos modelado, en la pestaña 'File' se selecciona la opción 'motion', la cual nos llevará al módulo NX de simulación de movimiento y una vez allí, iniciaremos el proceso de simulación.

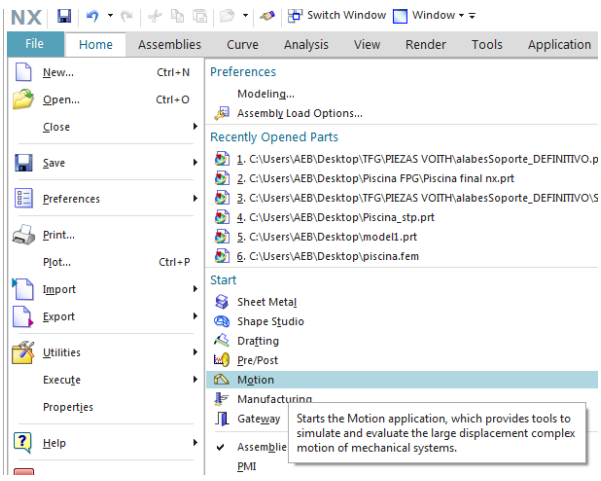


Figura 4-1 Inicio del módulo de simulación cinemática de Siemens NX

Lo más importante al comenzar es establecer que tipo de análisis de datos queremos; pudiendo elegir entre Kinematics y Dynamics. Kinematics permite una simplificación de las condiciones para realizar la simulación, pues no hace falta definir masas ni materiales. No obstante, se necesita que el modelo no tenga ningún grado de libertad, esto es, que todos los movimientos de cada parte de la pieza estén definidos. Por otra parte, el análisis Dynamics permite grados de libertad indefinidos pero con todas las partes definidas con sus masas y características materiales. Al querer en este caso mayor precisión en la simulación de los movimientos más que en el comportamiento debido a las masas de las piezas, se elige la opción Kinematics.

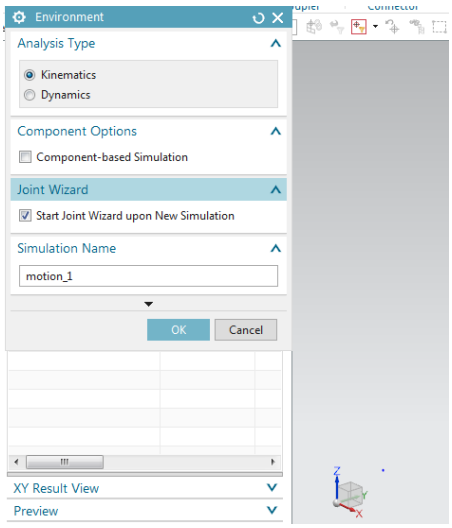


Figura 4-2 Opción 'Kinematics' para la simulación de movimiento

Una vez establecido el tipo de análisis que queremos, se procede a definir los enlaces que van a conformar cada parte del modelado. En la opción ‘Links’ podemos definir el tipo de enlace que queremos y entre que componentes del modelo. Se definen en total ocho enlaces, cinco referentes a los álabes (denominados como Alabe1, Alabe2, Alabe3, Alabe4 y Alabe5) los cuales consisten en un enlace entre el componente de álabe modelado en el CAD y la sujeción álabe-soporte pentagonal. Los enlaces restantes serán uno referido al soporte pentagonal (denominado Soporte), otro para el soporte (denominado Soporte) y un último para el círculo guía (denominado Circulo).

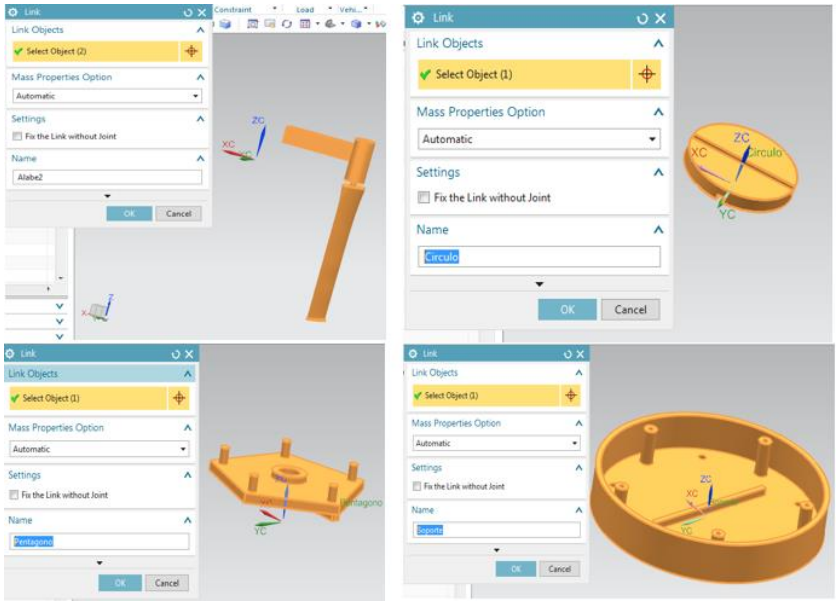


Figura 4-3 Definición de enlaces para simulación

A continuación, se procede a definir las juntas. Estos elementos sirven para especificar cada uno de los movimientos, absolutos y relativos, de los enlaces. Los hay de muchos tipos, pero en nuestro modelo se utilizarán sólo dos: la junta de revolución (o revolute joint) y la junta deslizante (slider joint).

Empezaremos por definir los movimientos del círculo guía y el soporte pentagonal. Como se ha explicado, estos dos elementos son los encargados de transmitir el movimiento de la palanca de control a los álabes para modificar sus ángulos de ataque. Estas dos piezas tienen la transmisión del movimiento en paralelo a la base y transversales entre sí, guiados por los raíles que poseen el soporte, círculo guía y soporte pentagonal en sus bases. Por lo tanto, escogeremos la junta deslizante o slider para ambos enlaces. En el caso del círculo, se especifica el origen de la junta en el centro del círculo y el vector del movimiento en la dirección del raíl, en este caso será el eje y. Además, se asociará la junta a la base sobre la cual se mueve, que es la base del soporte. En el caso del soporte pentagonal, su movimiento será también de junta deslizante. Origen de la junta en el centro del pentágono, dirección del movimiento en el eje x y asociado a la base superior del círculo guía.

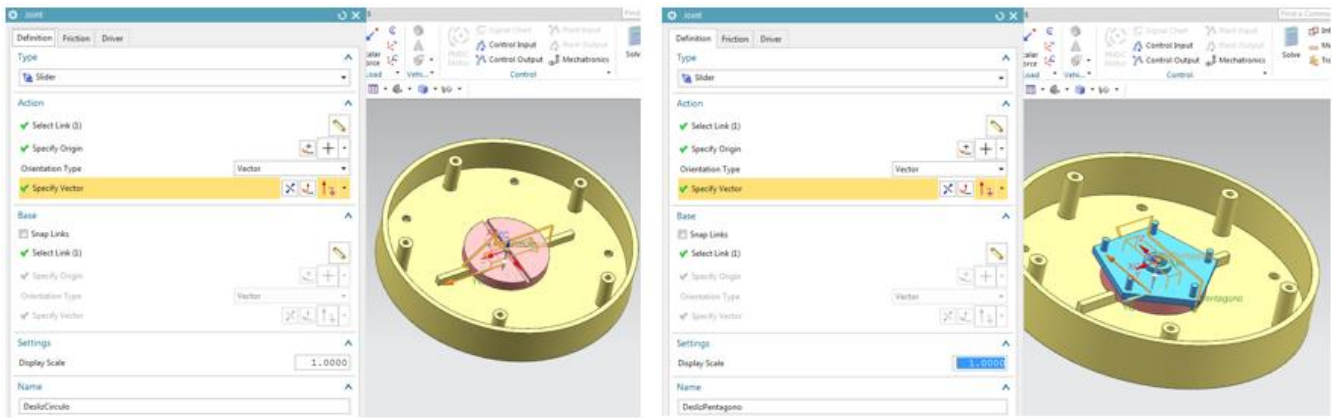


Figura 4-4 Juntas deslizantes para círculo guía y soporte pentagonal

A continuación, se especifica el tipo de junta requerida para el soporte. Se ha visto anteriormente que el soporte tendrá un movimiento de rotación provocado por el motor eléctrico que mueve el propulsor. Por lo tanto, la junta seleccionada es de rotación, con centro en el centro del soporte y eje z alrededor del cual se va a realizar la rotación.

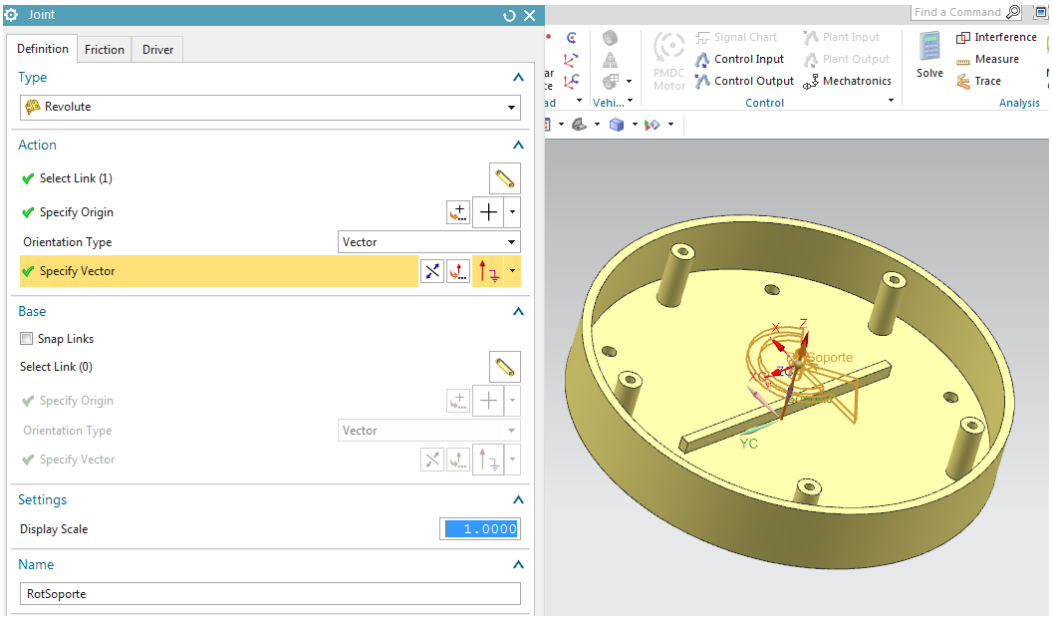


Figura 4-5 Junta de rotación del soporte

El movimiento de los álabes es el más complejo de simular. Para conseguir el movimiento adecuado, primero se crea una junta de rotación que esté centrada en el centro del álabe, y alineada con el agujero del soporte por el que está introducido. Se restringe la rotación alrededor del eje z, y por último se referencia el movimiento relativo al pentágono, para que rote respecto de él además de seguir el movimiento del soporte (por estar insertado en él). Sin embargo, esta junta no es suficiente para definir por completo el movimiento del álabe. Surje un problema a la hora de aplicar la junta y es que, en el momento de variar la posición del soporte pentagonal para modificar el ángulo de ataque de las palas, estos no cambian su posicionamiento como deberían. La solución a este problema ha sido aplicar a mayores de la junta, una restricción que haga que el saliente del soporte pentagonal que está insertado en la sujeción del álabe esté continuamente tocando el raíl del susodicho sobre el cual se tiene que mover, haciendo así que cuando se varíe el centro del pentágono, esta variación se transmita correctamente a los álabes, modificando sus ángulos de ataque.

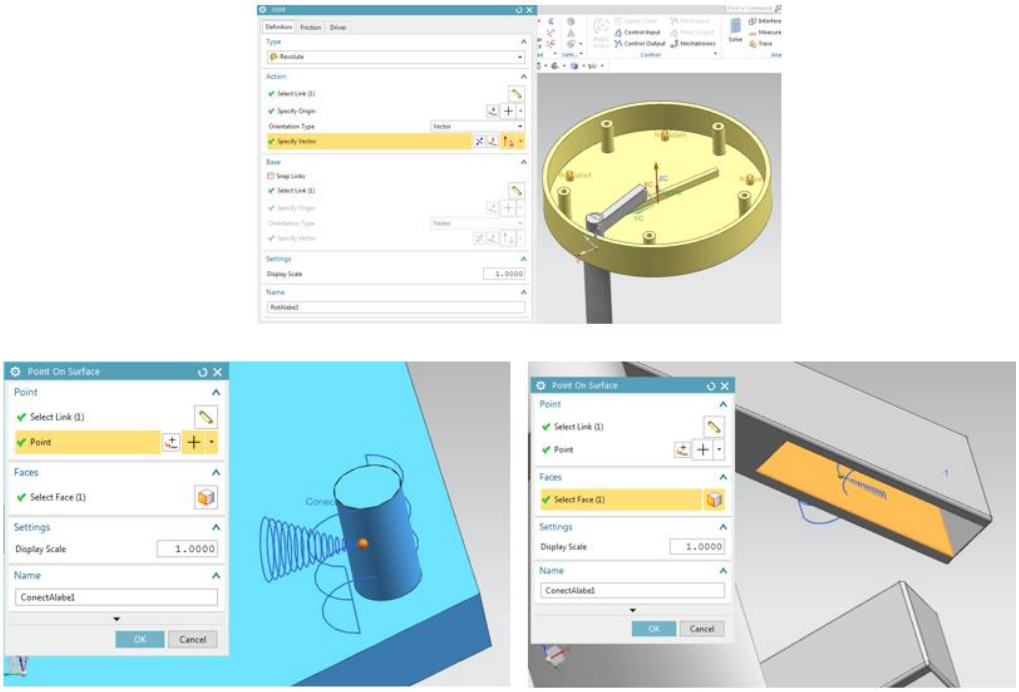


Figura 4-6 Junta y restricción de movimiento del álabe

Por último, para realizar la simulación de movimiento una vez definidos los enlaces, juntas y restricciones, se procede a establecer las velocidades de rotación del soporte, álabes, posición inicial del centro del soporte pentagonal y tiempo total de simulación. Para los álabes, se establece velocidad de rotación nula puesto que así mantendrá la posición relativa al centro del soporte pentagonal, que es lo que se busca. El soporte, por otra parte, tendrá establecido una velocidad de rotación de 36 grados/segundo; esto se establece así porque el tiempo de simulación es de 10 segundos y así se de una rotación completa del ensamblaje.

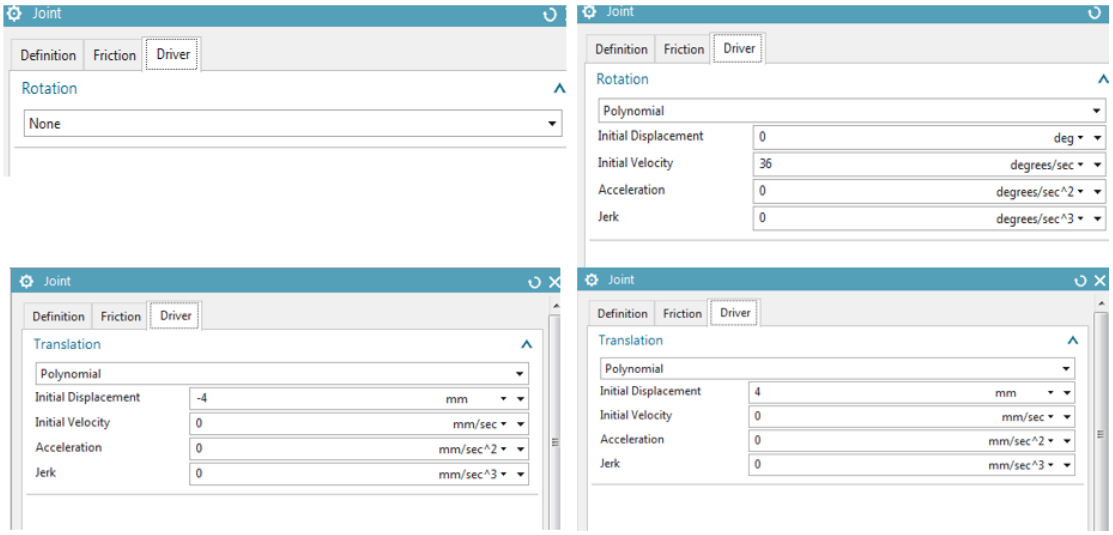


Figura 4-7 Velocidades de rotación de álabe y soporte, y posiciones iniciales de pentágono y círculo

Ya establecidas todas las condiciones de movimiento, solo queda resolver la cinemática establecida para que el programa represente los resultados, entre los cuales se pueden graficar los movimientos del modelo y visualizar una animación de la simulación planteada.

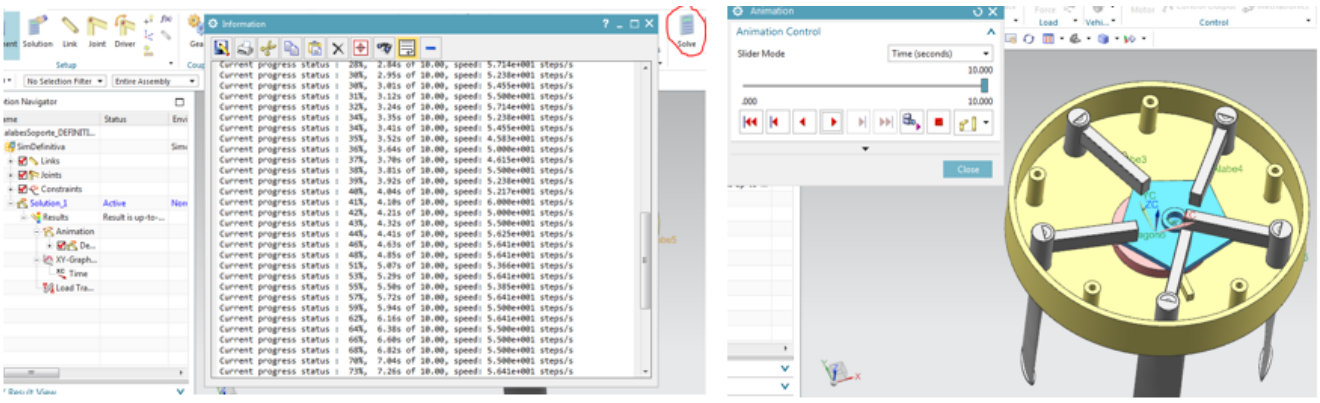


Figura 4-8 Resolución y animación de la cinemática del modelo

4.2 Simulación hidrodinámica [31]

Una vez establecido el movimiento en la simulación cinemática del modelo, se va a proceder a la simulación hidrodinámica. Dicha simulación consistirá en un análisis en 2D de una sección de los álabes a la cuál le asignaremos el movimiento correspondiente para analizar las velocidades y fuerzas que actúan sobre ellos. Esta simulación se realizará con el software de Ansys Fluent, apoyado por otras herramientas del Workbench de Ansys.

4.2.1 Importación y diseño de la sección

Para realizar la simulación hidrodinámica, es de vital importancia tener perfectamente definida la geometría del modelo a analizar, puesto que así los resultados obtenidos en el simulador podrán ser corroborados con otros obtenidos en ensayos experimentales en otros modelos.

En la realización de la geometría de la sección se ha importado un archivo CAD, diseñado en NX, para el software CAD de Ansys. Este software se compone de dos programas: el SpaceClaim y el DesignModeller. Para este caso concreto, al ser un diseño en 2D y no tener mucha complejidad en los que a geometría se refiere, se empleará el DesignModeller, puesto que es de uso más sencillo. Una vez importado el archivo CAD, se ejecute el software y analizaremos la geometría. A la sección de los álabes se le han añadido diferentes zonas para poder definir más adelante con el simulador de fluidos los movimientos de cada parte. Se ha delimitado en primer lugar toda la sección en una zona rectángular para definir la zona del espacio en la que se desarrolla la simulación, a esta parte la hemos denominado “outer_domain”. Por otra parte, se ha definido una circunferencia que simula el rotor del propulsor para poder definir más tarde el movimiento rotatorio de éste. Cinco circunferencias más, cada una alrededor de cada sección del álabe, conforman las zonas para realizar los movimientos rotatorios de estos.

Con este diseño de la sección para analizarla, se procede con el DesignModeller a definir cada una de las zonas anteriormente descritas como un cuerpo independiente, porque en el simulador de fluidos se necesitará dar a cada zona un movimiento diferente, y esto solo se puede hacer si cada zona es definida como un cuerpo independiente. En el DesignModeller esta operación se realiza con la opción “detach”. Una vez realizada se puede observar que se ha dividido la geometría en 12 cuerpos diferentes, los cuales se han denominado: outer_domain, para la zona de fluido exterior al propulsor; rotating_core es la zona que equivale a la zona de fluido que se mueve de forma rotatoria con el movimiento del rotor; cinco zonas referentes a cada una de las zonas de fluidos del movimiento de rotación de los álabes, las cuales se han

denominado outer_blade (del 1 al 5 en sentido horario siendo el outer_blade1 la zona correspondiente al álabe situado sobre el eje y); y por último las zonas que se refieren a cada uno de los álabes. Sin embargo, las zonas de los álabes no las necesitamos, puesto que son secciones sólidas de cada una de las palas, y en el simulador sólo se analizan zonas de fluido. Por lo tanto, se suprimen los 5 álabes para que cuando esté introducida la geometría en el simulador, se detecten como paredes y no sean atravesadas por el fluido (como debe ocurrir al ser sólidos).

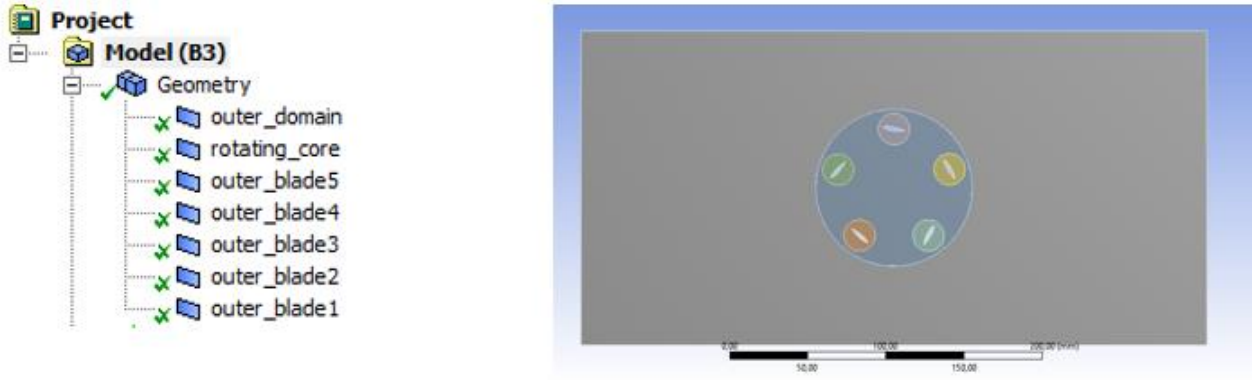


Figura 4-9 Establecimiento de geometría y división en varias partes de la misma

4.2.2 Mallado

A continuación, se va a explicar el mallado que se ha realizado sobre la sección para el análisis posterior en el simulador de fluidos. Esta operación consiste en una operación de aproximación de los problemas sobre cuerpos continuos, también llamado cálculo por elementos finitos. Lo que se realiza es una división del cuerpo en un número determinado de elementos, de tipo poligonal ya sean cuadrados o triángulos, asociándose entre ellos mediante los nodos que comparten. Una vez metidos los datos del problema, se calcula el resultado global por transmisión de los datos del ensamblaje entre todos los elementos del sistema. Por lo tanto, con el mallado lo que se consigue es simplificar el cálculo de un cuerpo continuo de forma discretizada basada en un número finito de puntos.

Para realizar el mallado con el software de Ansys, primero se cierra el programa Design Modeller con el cual hemos analizado la geometría de la sección e insertamos un nuevo módulo de mallado de Ansys, denominado en el programa como "mesh". Para trasladar los datos de la parte geométrica a la del mallado se arrastra el ratón desde la geometría hasta el módulo de mallado para que se importe de forma correcta, y una vez hecho esto se abre el modelador de mallados para crearlo.

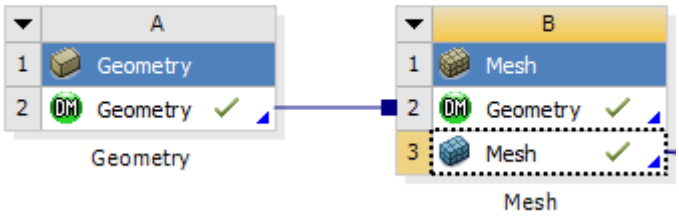


Figura 4-10 Inicialización del módulo de mallado con la geometría editada

4.2.2.1 Designación de zonas o "named selections"

Una vez inicializado el programa de mallado, primero comprobamos que se ha importado la pieza con todos los componentes definidos y nombrados como se había establecido anteriormente. Hay que especificar que en este apartado es vital, además del mallado, realizar la designación de las diferentes fronteras entre las piezas de la sección, pues así nos ahorraremos el definir cada una en el módulo de análisis de fluidos posterior. Por lo tanto, lo primero que realizamos es la designación de estas fronteras. Todos estos límites entre piezas en el programa se denominan "named selections", y se crean seleccionando cada borde perteneciente a una parte de la sección y, con el botón derecho del ratón, se pincha en "create named selection". Cabe destacar que para seleccionar los bordes de la sección hay que tener seleccionado el modo de selección correcto, el cual es bastante intuitivo porque está señalizado con una miniatura de un cubo con el borde resaltado.



Figura 4-11 Creación de partes significativas del modelo y selección de bordes

Las "named selection" que se crean son 28, y se pueden dividir en diferentes grupos dependiendo de que función vayan a cumplir en el simulador de fluidos más adelante y, en consecuencia, darles un determinado nombre refiriéndose al tipo de función que cumple y a que parte de la pieza pertenece. Están las zonas de fluidos, que conforman básicamente toda la superficie de la pieza que va a ser mallada, excluyendo los bordes y límites entre una parte y otra. A estas partes se les ha denominado como "fluid" y en el programa se han denotado como "f2d", añadiendo después la parte de la sección a la que pertenecen, teniendo f2d_outerdomain y f2d_rotatingcore, referido a la zona exterior al rotor y la zona del rotor respectivamente, y las 5 partes referidas a las zonas de cada uno de los álabes, denominándolas f2d_ob1, cambiando de número según el álabe al que se refiera.

La segunda categoría que se tiene de "named selections" es la referida a las interfaces entre zonas. Estas interfaces existen debido al método final que queremos emplear en el simulador de fluidos, queriendo obtener una animación del comportamiento del modelo en el fluido. Por lo tanto, estas interfaces están definidas como dos elementos de una misma frontera entre dos piezas, uno de los elementos referido a una pieza y el otro a la otra. De este modo, se podrá intercambiar información procedente de los nodos de ambas partes aunque estas roten entre sí. Estas interfaces se denominan como ifc_zona_a/b. Por ejemplo, la zona límite entre el outer domain y el rotating core tendrá una parte perteneciente a una zona (ifc_oi_a) y otra parte perteneciente a la otra zona (ifc_oi_b). Hay determinadas 12 named selections pertenecientes a interfaces en total, siendo estos los límites entre el outer domain y el rotating core, y las fronteras entre el rotating core y cada una de las zonas de los álabes (outer blade).

A continuación se encuentran las zonas denominadas como paredes o "walls". Estas fronteras lo que suponen, como su nombre indica, es que el fluido al llegar a ellas se comporta como si estuviera impactando contra un sólido y, por lo tanto, se desvía de su trayectoria, provocando un cambio en su velocidad y originando una fuerza que actúa contra el álabe. Las paredes se han denominado con la letra "w", indicando a continuación el número del álabe alque pertenecen. Por ejemplo, la pared del álabe 3 se define como "w_b3".

Por último, se definen las zonas que delimitan la sección de estudio de la pieza. Estas zonas son la de entrada de fluido, la de salida, y las zonas laterales. Para la zona de entrada del fluido, se define con el

nombre de “inlet”, el cual es el nombre genérico en estos casos como ya veremos más adelante en el simulador de fluidos. La zona de salida de fluido, por otra parte, se denomina “outlet” por las mismas razones que la de entrada. Las zonas laterales se llamarán “sym_up” y “sym_bottom”, respectivamente a la zona superior y a la inferior, por el nombre que tienen de simetría para los casos como este en el que se definirán los bordes laterales de una manera tal, que hidrodinámicamente equivalgan a que no hubiera ningún límite lo suficientemente cercano como para que pudiera afectar al comportamiento del fluido. De esta forma, se comportará como si todo el fluido del outer domain fuera equivalente a un propulsor situado en aguas libres o mar abierto.

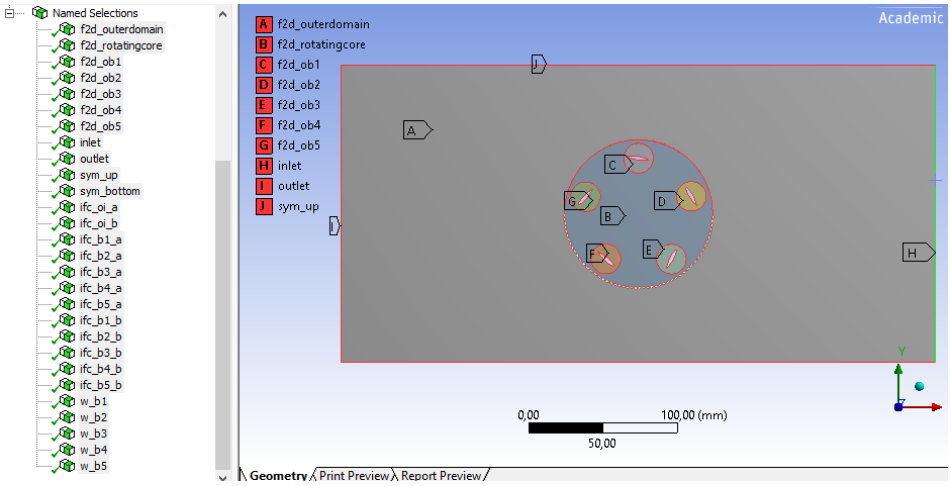


Figura 4-12 “Named selections” definidas para la sección

4.2.2.2 Creación del mallado

El proceso de creación del mallado de la pieza es fundamental para el correcto desarrollo de los cálculos en el programa de análisis del fluido. Nada más abrir el programa de mallado de Ansys se puede observar en el menú “Project” que se ha creado un apartado denominado “Mesh”, correspondiente a la malla que se va a crear. En un primer momento esta malla no está definida, puesto que tenemos que asignar una serie de características al mallado para que sea eficaz y coherente a lo que queremos analizar y la precisión que deseemos. Sin embargo, existe una herramiento de mallado genérico en este programa el cual aplica una malla por defecto a la pieza que hemos cargado para realizar una primera aproximación a la pieza. No obstante, si seleccionásemos esta opción comprobaríamos que el mallado resultante no es adecuado para nuestro caso, pues estaría compuesto por elementos demasiado grandes para la zona de análisis y con formas rectangulares que no se ajustarían adecuadamente a las dimensiones de las piezas.

El mallado genérico que nos plantea el programa es, por lo tanto, inadecuado para su uso en nuestro análisis, por lo que se realiza un ajuste en las dimensiones de los elementos, sus formas, y número. Primeramente se establecerán el tipo de formas poligonales que se quieren para el mallado, que en nuestro caso serán triangulares. Esto se selecciona en el apartado de “Mesh Control” y dentro de este apartado, pinchando en “Method”, se selecciona “All Triangles Method” y se incluyen todos los cuerpos en él.

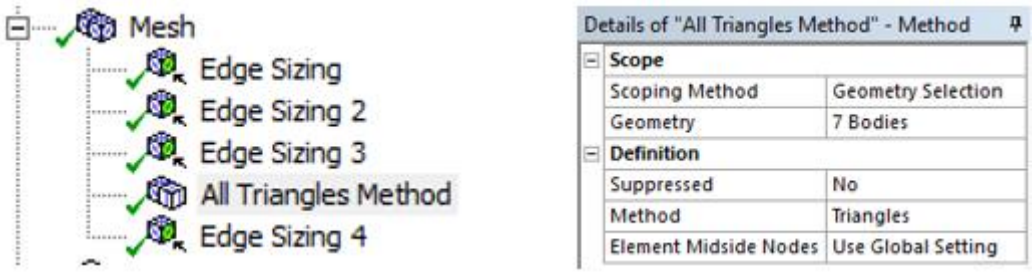


Figura 4-13 Control de mallado y método de mallado

El siguiente paso que se realiza en el control de mallado, como se aprecia en la figura 4-13, es el establecimiento del tamaño de los elementos de la malla para cada una de las partes de la pieza. En nuestro caso, se han realizado cuatro tipos de divisiones, una para los bordes de las zonas de rotación de los álabes (outer blades), otra para las paredes de los álabes (blades), otra para el contorno de rotación del rotor (rotating core) y una última para las zonas exteriores (inlet, outlet, symmetry up y symmetry bottom). Para las zonas más importantes de la sección, en la que se requieren mayores grados de precisión, se han establecido un mayor número de divisiones con el objetivo de que haya un mayor intercambio de información y se ajuste en mayor medida a la realidad. En concreto, se ha establecido el mayor número de divisiones para la zona de las paredes de los álabes, con 50 divisiones; seguida por el rotating core, aun con 80 divisiones, tiene elementos mayores debido a la mayor superficie que ocupa; las zonas de rotación de los álabes se dividen en 15 partes cada una de ellas; y por último las zonas externas, a las que se les ha establecido un tamaño de elemento de 10 milímetros.

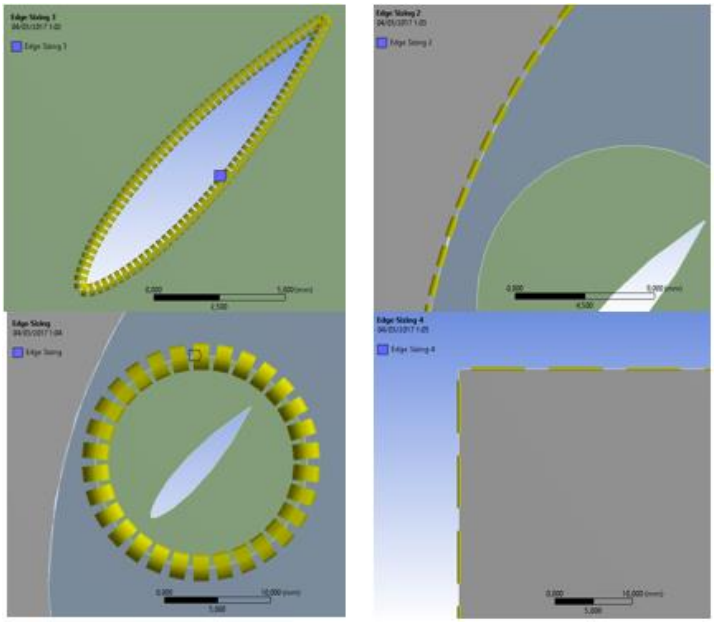


Figura 4-14 Tamaño de elementos para las partes del modelo

Una vez realizados los ajustes pertinentes para un correcto mallado del modelo, se selecciona la opción “Generate Mesh” que esta vez generará una malla de acuerdo a los requisitos establecidos, visualizándose en la pantalla principal. Generada la malla, podremos observar que se ha generado un apartado en el menú de navegación del proyecto, llamado “Connections” con una carpeta llamada “Contacts” en su interior. Este apartado contiene las diferentes zonas de contacto entre piezas del modelo en la malla. Como nosotros hemos establecido ya todas las zonas de interfaz, fluidos y paredes de nuestro

modelo, desactiveramos estas conexiones con la opción de “Suppress”. Esto es debido a que si no hubiéramos definido todos los nombres de las zonas anteriorente, cuando exportaramos la malla al simulador hidrodinámico, estas interfaces se generarían automáticamente con un nombre genérico el cual dificultaría la identificación de a que parte pertenece cada uno. De esta forma, nos ahorramos tiempo de corrección de nombres asignándolos ya a la hora de mallar.

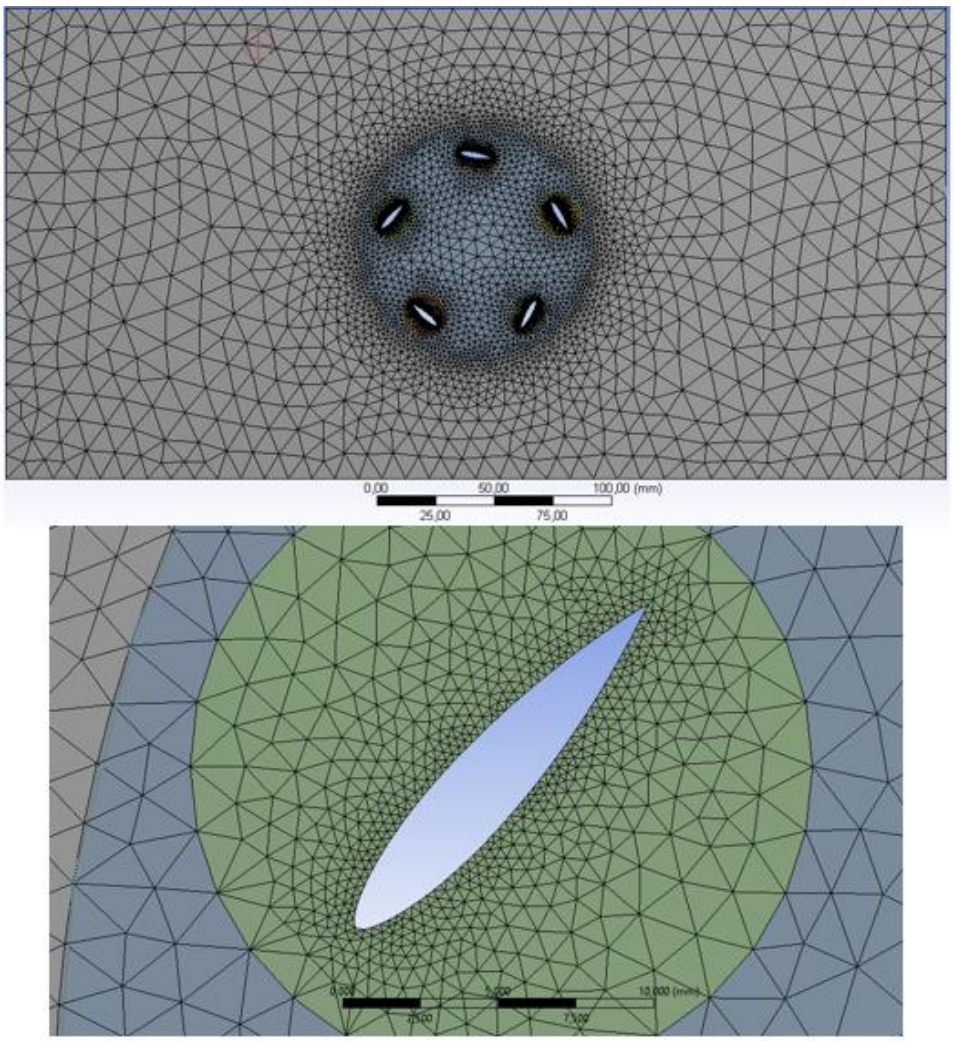


Figura 4-15 Vista general y detalle de mallado

4.2.3 Análisis hidrodinámico

Una vez realizada la importación de la geometría y haberse definido el mallado para toda la pieza, se procede a ejecutar el análisis hidrodinámico de la misma. Para este análisis se emplea el programa Fluent de Ansys, el cual se importa de manera análoga al mallado del apartado 4.2.2. Se define un módulo de Fluent en el Workbench de Ansys y, una vez establecido, se arrastra el mallado realizado previamente hasta la pestaña “setup” del Fluent. De esta manera se habrá importado la pieza mallada y ya podremos empezar a trabajar sobre ella. Al clicar en la pestaña “solution”, se abrirá un selector de opciones en el cual nos vendrá preseleccionado el análisis en 2D, debido a que con la geometría ya realizada puede detectar que es una pieza en dos dimensiones. Sólo nos hará falta clicar en la pestaña “double precisión” para tener una aproximación más fiable a la realidad.

El Ansys Fluent es un software de análisis CFD, o de dinámica de fluidos computacional, el cual asigna a piezas malladas unas determinadas propiedades físicas y dinámicas para poder analizar luego diferentes parámetros tales como velocidades absolutas o relativas, fuerzas y momentos, entre otros. En este programa se pueden analizar múltiples tipos de comportamientos, desde el movimiento de un buque influenciado por las olas en mar abierto, hasta simulaciones de turbinas eólicas. Todo depende del tipo de geometría que importemos y el fluido en el cual se quiere realizar la simulación, pudiendo hacerse además en dos o tres dimensiones, aunque en nuestro caso será en 2D, como ya se ha explicado.

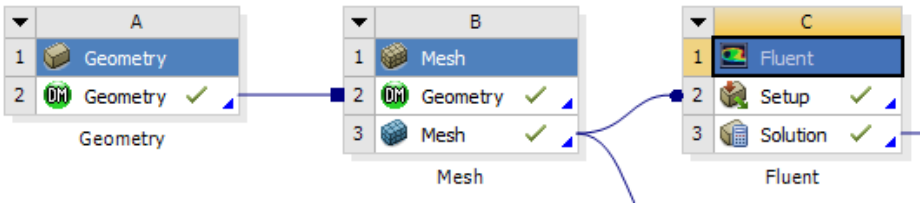


Figura 4-16 Inicialización de Fluent con carga del mallado realizado previamente

Con el programa Fluent, tenemos varias formas diferentes de realizar el análisis hidrodinámico. En este caso se podrían utilizar dos aproximaciones diferentes a la solución final, son el Moving Reference Frame, o MRF, y el Sliding Mesh. El método MRF consiste en analizar todas las piezas y sus movimientos de manera estática para una posición dada, es decir, el programa analiza los datos del ejercicio planteado en Fluent y los presenta de manera estática en pantalla, dando una primera aproximación bastante acertada a la solución real del sistema. Por otra parte, el método de Sliding Mesh o mallas deslizantes consiste en representar exactamente el movimiento del sistema para su exacto análisis, planteando una animación en pantalla cuando ya está resuelto el sistema para que el usuario pueda ver de manera más precisa toda la solución del problema planteado.

4.2.3.1 Realización del Sliding Mesh

Se va a realizar ahora el análisis hidrodinámico del sistema, escogiendo el método de malla deslizante o "sliding mesh" debido a su mayor precisión y por querer disponer de una animación a posteriori para así tener una solución más visual a nuestro análisis. Una vez abierto el programa Fluent, empezamos por mirar en el árbol de procesos del programa, en la parte izquierda, la pestaña "boundary conditions". Si se despliega podremos ver todas las zonas que se han designado en el programa de mallado ya con las características de cada tipo de zona asignadas. Si se encuentra algún tipo de discordancia entre el tipo de zona asignado y la que debería asignarse, se puede cambiar con el botón derecho del ratón sobre ella y seleccionando "type" para elegir el tipo que se requiere. También es conveniente fijarse en la pestaña "Setting Up Domain", y dentro de ella en las opciones "Transform", "Scale" y "Units". En ellas se comprueba el tipo de escala seleccionada para el análisis y el tipo de unidades asignadas a cada magnitud del programa.

Una vez realizadas las comprobaciones iniciales del programa, se procede a definir las interfaces para el sistema de análisis con los elementos que se definieron como interfaces durante el proceso de mallado. Esto se realizará en la pestaña "Interfaces" del setting up domain, y seleccionando "Mesh…", tras lo cual se abrirá un menú para crear y editar las interfaces de la malla. En este menú, se crean los nombres para cada interfaz y asignando a cada una las zonas que la conforman. Así, para dos componentes de una interfaz que previamente se denominaron como "ifc_b1_a" y "ifc_b1_b" se creará la interfaz "ifc_b1". Este proceso se realizará para las cinco interfaces de las zonas de los álabes y para la del rotating core. Una vez nombradas y definidas, se clica en la opción "Create" y así quedarán listas. Después de crear las

interfaces en la misma pestaña de Setting Up Domain, se clicará en la opción “Check” para que el sistema compruebe que no hay incongruencias en el dominio del modelo a analizar.

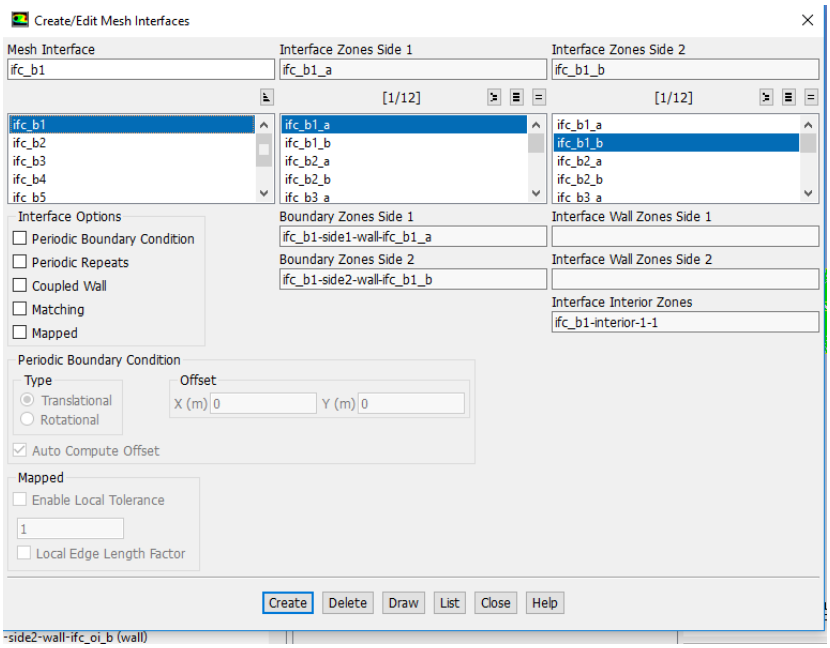


Figura 4-17 Creación de las interfaces del modelo

Una vez establecidas las interfaces del sistema, se procede a establecer los ajustes físicos en la pestaña “Setting Up Physics”. Como se quiere obtener una animación en movimiento el propulsor al resolver el problema, se selecciona la opción “Transient” en el tiempo. Otra consideración importante que hay que tener en cuenta es el material que está establecido por defecto en el sistema, que es el aire, mientras que se necesita que sea agua. Por lo tanto, en la pestaña “Materials” se selecciona la opción de crear o editar material, viendo que sólo aparece el aire como fluido único a seleccionar. Habrá que seleccionar la base de datos de Fluent (Fluent Database) y de la lista de fluidos que hay ahí, importamos el agua líquida, quedando seleccionada para poder asignarla posteriormente a las zonas del mallado. Además de cargar el material, se debe asignar el tipo de modelo de viscosidad para el cálculo de datos. En este caso se escoge el modelo de k-epsilon realizable, con el resto de opciones seleccionadas según vienen por defecto.

Se procede ahora a seleccionar las condiciones de movimiento de cada una de las zonas en el apartado “Zones”, y dentro de este en “Cell Zone Conditions”. Pueden observarse las 7 zonas del modelo: las cinco pertenecientes a las zonas de fluido de los álabes, el rotating core y el outer domain. El outer domain al ser la zona exterior y estática del modelo, no se modifican sus parámetros más que para asignarle de fluido el agua líquida en vez del aire que tenía asignado por defecto; este cambio de fluido ha de realizarse con todas las zonas. Posteriormente, se selecciona la zona del rotating core pinchando en la opción de “Mesh Motion” para designarla como parte dinámica de la malla. El rotating core será la zona la cual será referencia absoluta del sistema en cuanto a movimiento se refiere, por lo que en especificaciones relativas respectos a la zona se seleccionará “absolute”, con el origen del eje de rotación en el centro geométrico del rotatin core, y con la velocidad de revolución, en rpm, que se haya establecido para el análisis. Lo mismo se realizará para las zonas de los álabes, con la diferencia que en ellas, la velocidad tiene que ser relativa a la referencia absoluta, es decir, el rotating core, especificando también la velocidad de rotación que tienen calculada para todos, y definiendo en cada uno su origen de rotación que será el centro de cada álabe.

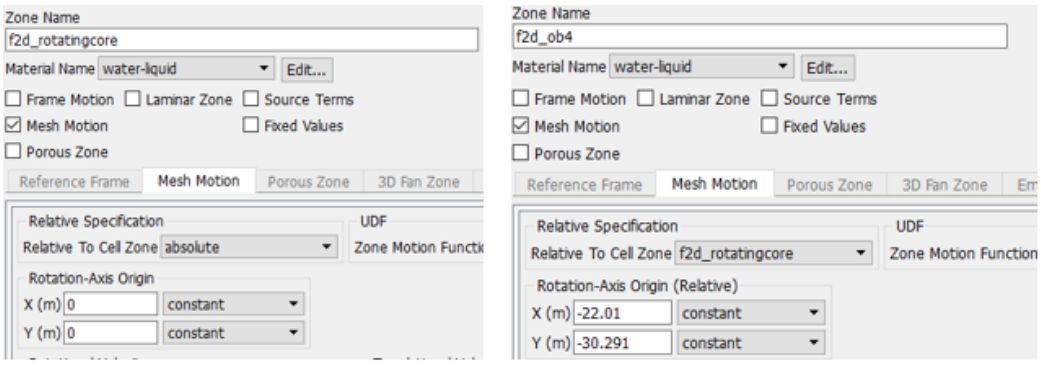


Figura 4-18 Condiciones de movimiento de las zonas del mallado

A continuación, se establecen las condiciones de los bordes del sistema, los cuales son los límites del outer domain: la entrada de fluido o inlet, la salida de fluido o outlet, y las paredes de los álabes. En la misma pestaña anterior de "Zones", igualmente dentro del "Setting Up Physics", encontramos la opción de "Boundary Conditions". En la ventana que se abre al seleccionar las condiciones de los límites, seleccionamos primero el borde de entrada de fluido, y determinamos que el método de especificación de la velocidad sea "Magnitude, Normal to Boundary", para que la entrada de fluido al sistema sea perpendicular al borde del inlet; y para la especificación del método de turbulencia escogemos la opción de "Intesity and Length Scale", dejando el resto establecido por defecto. Para la salida de fluido, o outlet, simplemente se establece que la salida de fluido también sea perpendicular al borde, "Normal to Boundary" en la casilla de especificación de la dirección del flujo saliente. Para las condiciones de las paredes de los álabes, se especificará que deben de ser paredes dinámicas ("Moving Wall") y que su movimiento sea de rotación relativo a la zona de mallado adyacente a la pared, con una velocidad de giro nula respecto a la misma, y con el eje de rotación el centro del álabe. Se aplicarán estas características a cada uno de los álabes.

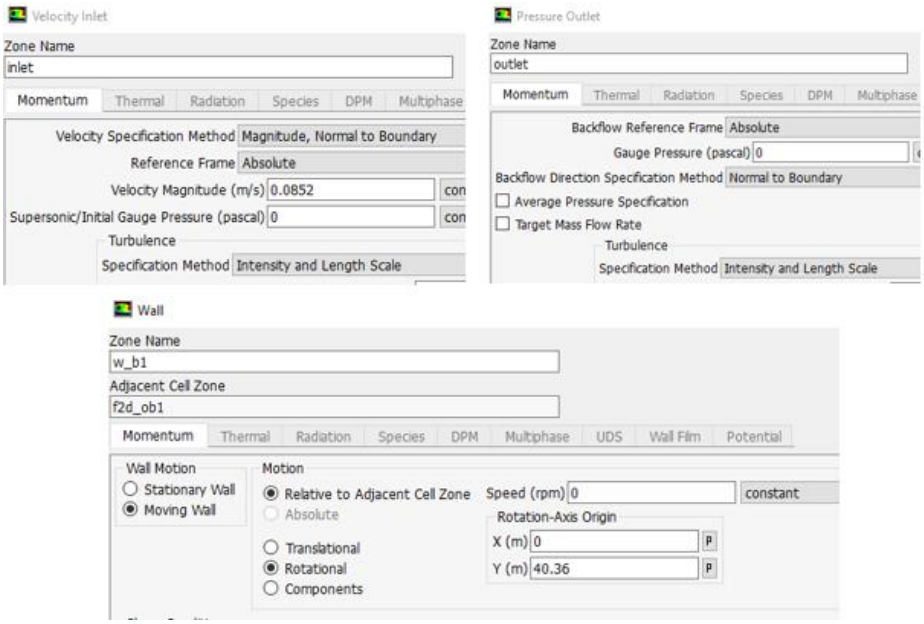


Figura 4-19 Condiciones de movimiento de inlet, outlet y paredes de los álabes

Establecidas ya todas las condiciones de las diferentes zonas del modelo, se procede a la configuración de los cálculos parala solución. En la pestaña “Solving” se encuentran las diferentes opciones para configurar la solución del problema. Primero se establece el acoplamiento de datos velocidades-presiones en modo “Coupled”, dentro de la opción de “Methods…” para que estén relacionadas entre sí, y en la parte de inicialización de la solución, se escoge el método “Standard”, además de clicar una vez escogido el método en “Initialize” para que se ponga el tiempo a cero. Como queremos realizar una animación en la resolución del sistema, se elige dentro de la zona de “Activities” la opción “Create” y posteriormente “Solution Animations”. Al seleccionarlo, se abrirá una ventana para poder crear la animación, primero se selecciona una sola secuencia de animación (apartado “Animation Sequences”) y se establece que se haga los cálculos mediante “Time Step”, clicando posteriormente en la opción “Define…” para seguir con la configuración de la animación. El tipo de display que es requerido para esta solución es de visualización de los contornos, por lo que se selecciona esa opción, especificando que se muestren los vectores en magnitud de la velocidad del fluido, estableciendo un límite máximo y mínimo para garantizar que se encuentren entre los dos rangos la gráfica de animación. Se selecciona por último en opciones solamente las pestañas de “Filled” y “Node Values”, y hecho esto se clica en el botón de “Display” y se cierran el resto de ventanas de la configuración de la animación en “Ok”.

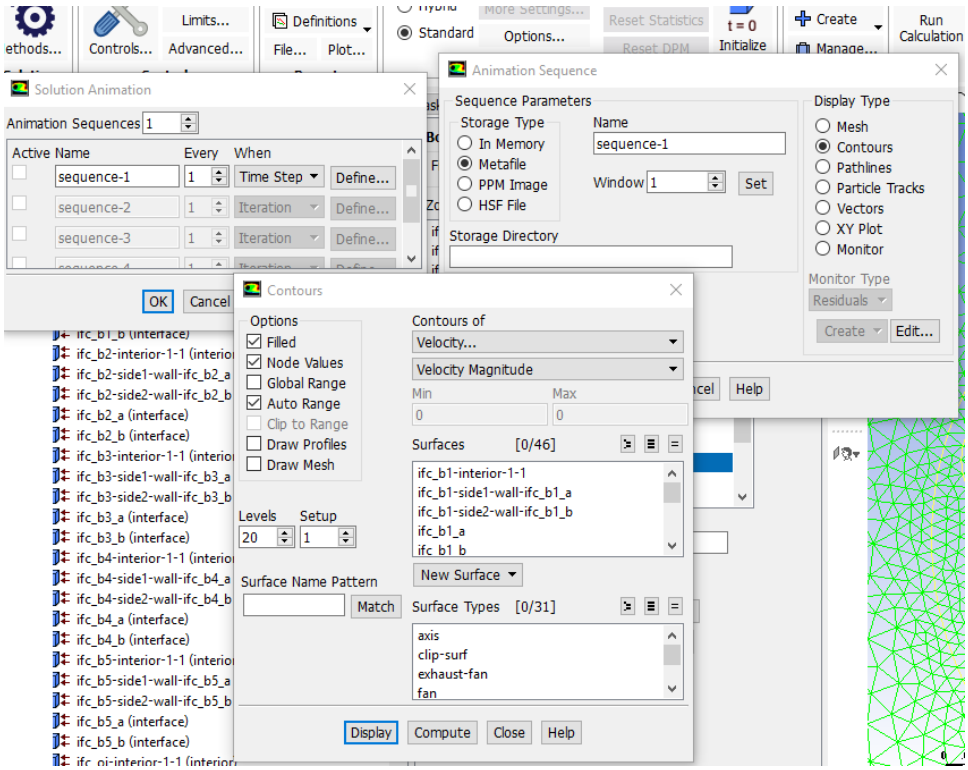


Figura 4-20 Pasos a realizar para la configuración de la animación

Ya configuradas las características de la animación que nos va a presentar el programa, se guarda el proyecto para que se fijen todos los parámetros y en la pestaña de “Solving” se selecciona el apartado “Run Calculation”, dentro del cual estableceremos el número y el tamaño de los “Time Steps” para configurar el modo de realizar iteraciones del programa. Estos dos datos en el problema serán de 0,005 segundas para el tamaño y 200 para el número de time steps (esto es debido a la velocidad de rotación establecida para el rotating core). A continuación se clicará en el botón de “Calculate” y habrá que esperar a que termine el programa de realizar las iteraciones y llegue a una solución. Una vez alcanzada la convergencia, se podrá visualizar la animación en el apartado de post-procesado, entrando en

"Animation" y posteriormente "Solution Playback…", el cual abrirá una ventana de reproducción de la animación para así poder visualizarla.

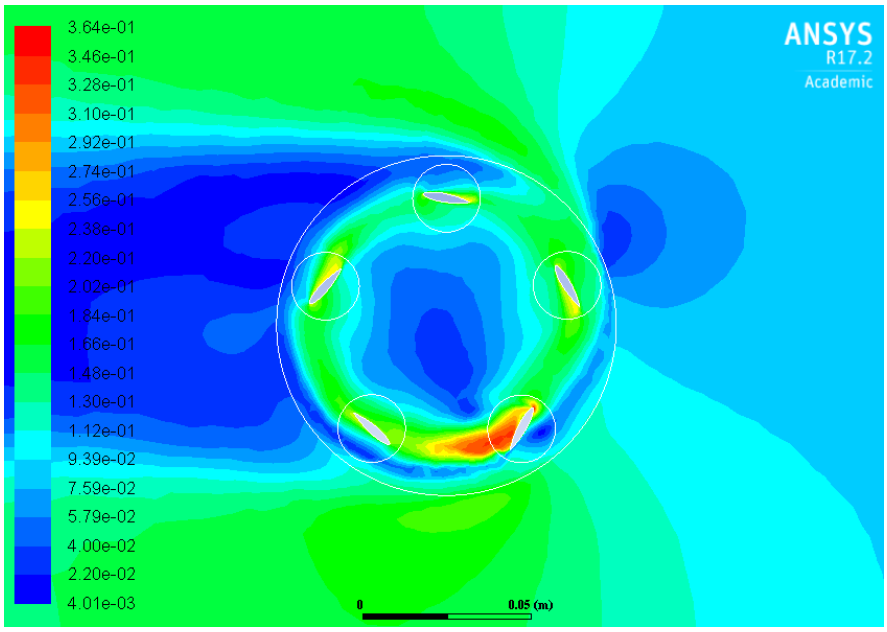


Figura 4-21 Resultados visualizados en el Ansys Fluent

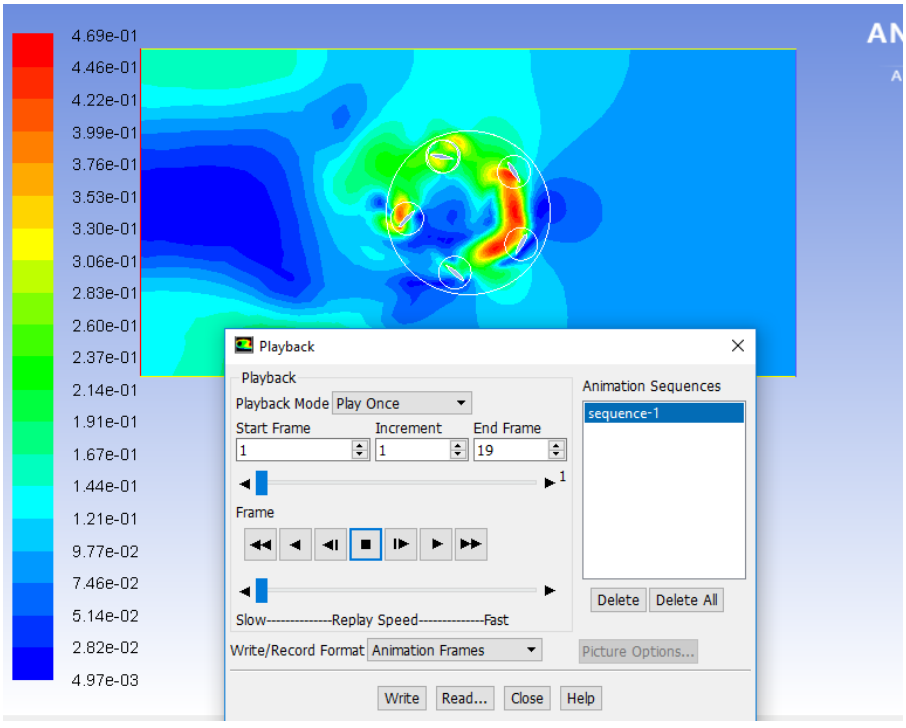


Figura 4-22 Visualización de la animación

5 JUSTIFICACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se va a proceder a realizar una serie de cálculos analíticos sobre el modelo de VSP con los datos del perfil NACA 0012, los mismos que posee nuestro propulsor diseñado y analizado en los anteriores apartados, para poder ver los resultados que se obtienen de forma teórica y de esta forma justificar los obtenidos en el simulador hidrodinámico del Ansys Fluent. Además, se obtendrán los datos de partida del planteamiento del problema en el simulador hidrodinámico a partir de datos obtenidos de gráficas experimentales para extrapolarlos al modelo diseñado con las debidas y justificadas modificaciones.

5.1 Datos de partida para el modelo del trabajo

Para poder realizar la simulación y análisis hidrodinámico del VSP, se necesita tener unos datos validables como partida, para saber que la configuración es correcta y, en consecuencia, como resultado se tengan unos cálculos fiables. Debido a ello, con los datos de la geometría del álabe que se ha diseñado, y para una velocidad de rotación establecida, se han obtenido los datos necesarios para la simulación hidrodinámica en Fluent. El parámetro clave que buscamos es el de la velocidad de avance.

Los datos de los que partimos de forma experimental sacados de la geometría del VSP diseñado son dos: el diámetro del rotor y el segmento ON de excentricidad. Estos dos datos son de mucha utilidad, pues nos darán la excentricidad del movimiento para la posición determinada en la que se han puesto para su análisis.

De esta forma, sabemos que:

$$ON = a = 18\ mm$$

Y que:

$$D = 2R = 74\ mm$$

Por otra parte, se va a establecer una velocidad de rotación del propulsor:

$$n = 60\ rpm = 1\ s^{-1}$$

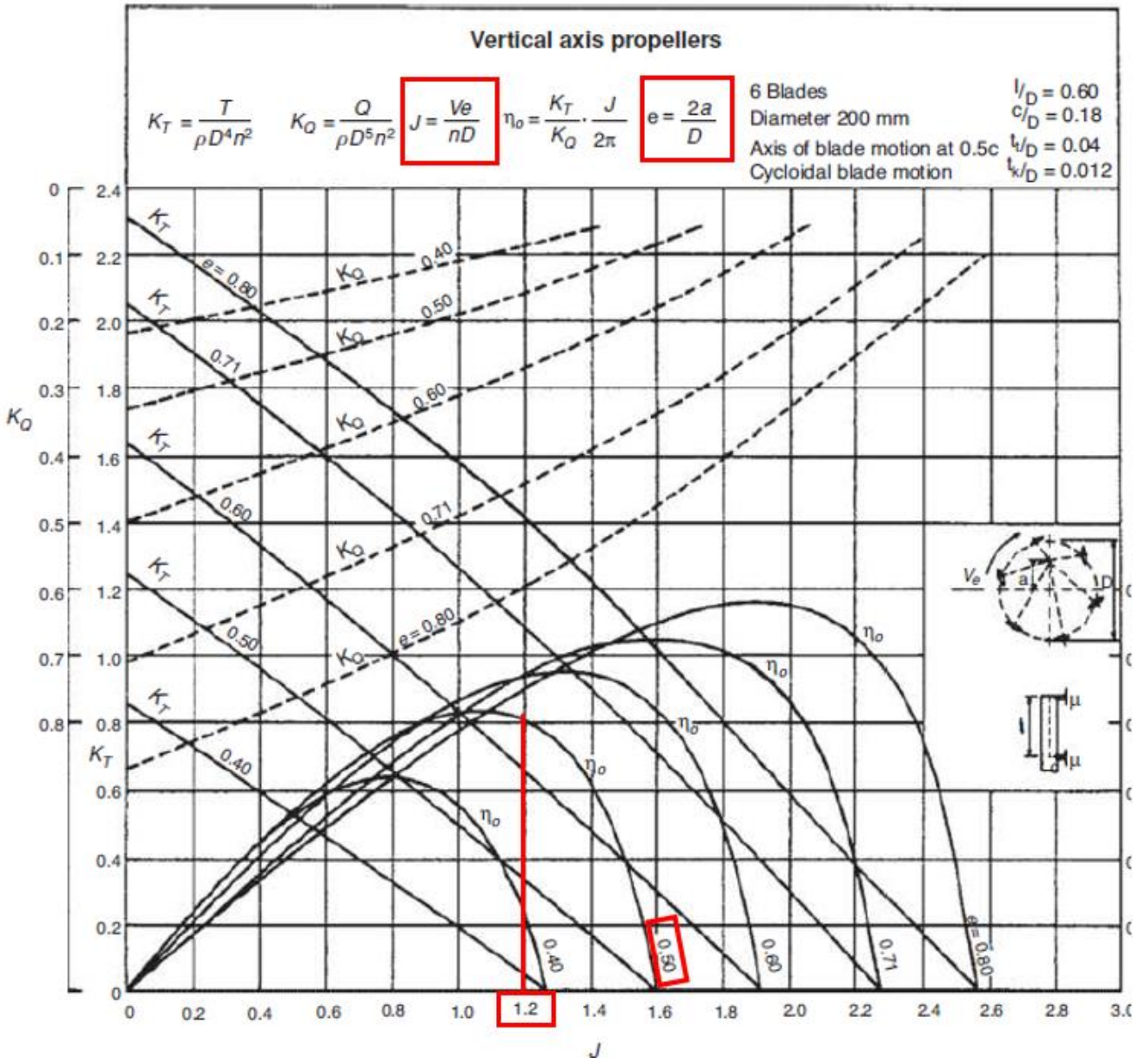


Figura 5-1 Tabla de datos experimentales para propulsores de eje vertical [26]

Una vez calculados los dos parámetros del propulsor, se obtiene con la fórmula de la Figura 5-1 el valor numérico de la excentricidad.

$$e = \frac{2a}{D} = 0{,}49 \sim 0{,}5$$

Con este valor de excentricidad y un valor medio de coeficiente de avance $J = 1{,}2$ se puede obtener la velocidad de avance para así introducirla en los cálculos del simulador.

$$J = \frac{V_e}{nD}\ ;$$

$$V_e = nJD = 0{,}089\ ms^{-1}$$

Estos datos obtenidos serán los necesarios que se tienen que insertar en el simulador para resolver el análisis hidrodinámico.

5.2 Datos para resolución analítica de velocidades y fuerzas [32]

Para el completo desarrollo de este TFG, se necesitan también de datos teóricos que apoyen las simulaciones y los análisis aquí realizados. De esta forma, en este apartado se van a realizar una serie de cálculos con las ecuaciones que definen el movimiento, velocidades y fuerzas que determinan el comportamiento de un propulsor Voith-Schneider en funcionamiento a través de un flujo de fluido. Por lo tanto, partimos de un VSP de número de palas $Z = 5$, área de la sección del álabe $A = 24{,}8\, mm^2$, velocidad de rotación $n = 60\, rpm = 1 s^{-1}$, excentricidad $e = 0{,}5$; velocidad de avance $V_A = 0{,}089\, ms^{-1}$ y radio $R = 37mm$.

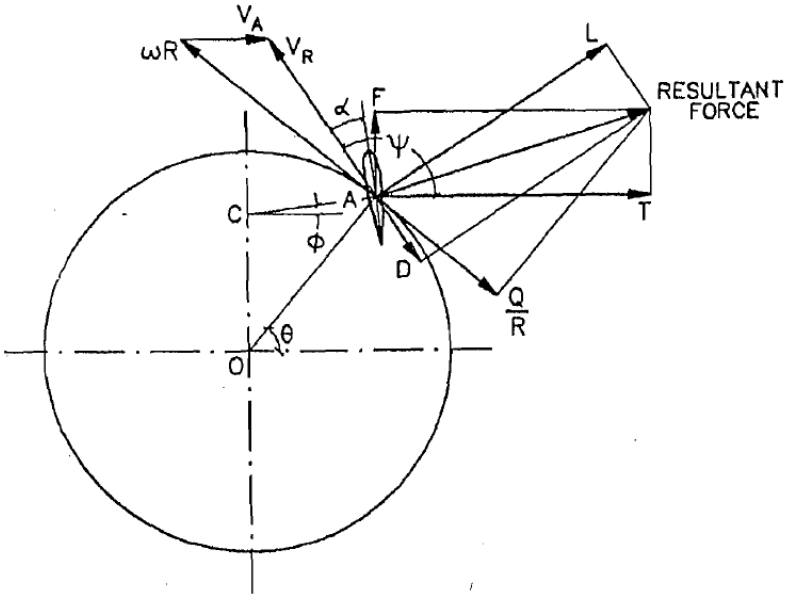


Figura 5-2 Representación gráfica de los parámetros a tener en cuenta para la resolución del problema [32]

En la figura 5-2 se pueden apreciar los diferentes parámetros de los cuales o bien sacamos datos o bien los obtenemos mediante ecuaciones. A continuación, se explicarán los nombres de todos los parámetros que aparece en el esquema de la figura 5-2, exceptuando aquellos que ya se han explicado por ser datos de partida del problema.

- ω: Es la velocidad angular de los álabes. Multiplicada por el radio R se obtiene la velocidad tangencial.
- C: Es el punto excéntrico respecto al cual se mueven los álabes relativamente. En anteriores apartados se definió como N. Los segmentos OC y CA serán de gran importancia en los cálculos posteriores.
- O: Es el centro del rotor.
- A: Es el centro del álabe.
- V_R: Velocidad de arrastre. Es la resultante entre la velocidad tangencial y la de avance.
- D: Fuerza de arrastre, definida mediante cálculos del coeficiente de arrastre, C_D.
- L: Fuerza de sustentación, definida mediante cálculos del coeficiente de sustentación, C_L.
- F: Se define como la fuerza transveral, relacionada con la de arrastre y sustentación.
- T: Definida como la fuerza de empuje, la que le da el movimiento de avance al buque.
- $\frac{Q}{R}$: Torsión del sistema en un punto determinado.

- θ: Es el ángulo que forma la horizontal con el segmento OA, unión del centro del rotor con el centro del álabe.
- φ: Ángulo entre la horizontal y el segmento CA, que une el punto excéntrico del VSP con el centro del álabe.
- ψ: Es el ángulo que forman la velocidad de arrastre con la horizontal.
- α: Ángulo de ataque del álabe. Es el que forma la velocidad de arrastre con la línea de simetría del álabe.

Una vez definidas todas las variables y elementos que intervienen en este problema, se procede a su resolución. Para ello, se pretende crear una tabla de cálculo en la cual se introducirán los datos del VSP con el que se trabaje, y con las ecuaciones que se van a explicar a continuación, se calculen automáticamente los datos de velocidades y fuerzas necesarias para explicar todo el comportamiento del propulsor.

DATOS	
R (radio) m	0,037
e (excentricidad)	0,5
ω (vel. angular) rad/s	6,283
n (vel. rotación) 1/s	1
V_A (velocidad de avance) m/s	0,089
A (superficie del álabe) m2	0,0000248
ρ (densidad del agua)	998,2

Tabla 5-1 Datos de partida. En verde aquellos datos que es necesario introducir manualmente

Ángulos												
θ	senφ	cosφ	tan φ'	φ	φ (corregido)	V_R	$V_R$cos ψ	$V_R$sin ψ	ψ	ψ (corregido)	α	α (corregido)
deg	-	-	-	deg	deg	$m\,s^{-1}$	$m\,s^{-1}$	$m\,s^{-1}$	deg	deg	deg	deg
0,000	-0,447	0,894	-0,500	-26,565	333,435	0,249	0,089	0,232	69,052	69,052	5,617	5,617
30,000	0,000	0,866	0,000	0,000	360,000	0,203	-0,027	0,201	97,705	97,705	7,705	7,705
60,000	0,405	0,553	0,732	36,206	36,206	0,162	-0,112	0,116	134,021	134,021	367,815	7,815
90,000	0,577	0,000	∞	90,000	90,000	0,143	-0,143	0,000	180,000	180,000	360,000	0,000
120,000	0,405	-0,553	-0,732	143,794	143,794	0,162	-0,112	-0,116	-134,021	225,979	352,185	-7,815
150,000	0,000	-0,866	0,000	-180,000	180,000	0,203	-0,027	-0,201	-97,705	262,295	352,295	-7,705
180,000	-0,447	-0,894	0,500	-153,435	206,565	0,249	0,089	-0,232	-69,052	290,948	354,383	-5,617
210,000	-0,816	-0,707	1,155	-130,893	229,107	0,288	0,205	-0,201	-44,449	315,551	356,444	-3,556
240,000	-1,053	-0,385	2,732	-110,104	249,896	0,313	0,290	-0,116	-21,819	338,181	358,284	-1,716
270,000	-1,134	0,000	∞	-90,000	270,000	0,321	0,321	0,000	0,000	360,000	360,000	0,000
300,000	-1,053	0,385	-2,732	-69,896	290,104	0,313	0,290	0,116	21,819	21,819	1,716	1,716
330,000	-0,816	0,707	-1,155	-49,107	310,893	0,288	0,205	0,201	44,449	44,449	3,556	3,556
360,000	-0,447	0,894	-0,500	-26,565	333,435	0,249	0,089	0,232	69,052	69,052	5,617	5,617

Tabla 5-2 Datos de ángulos y velocidades para el VSP

Fuerzas en cada álabe							
θ	C_L	C_D	L	D	T	Q/R	F
deg	-	-	mN	mN	mN	mN	mN
0,000	0,562	0,062	0,430797	0,047206	0,385445	0,198108	0,109936
30,000	0,770	0,089	0,393652	0,045658	0,396220	0,191587	-0,098024
60,000	0,781	0,091	0,252748	0,029454	0,202216	0,097895	-0,196819
90,000	0,000	0,030	0,000000	0,007644	0,007644	0,007644	0,000000
120,000	-0,781	0,091	-0,252748	0,029454	0,202216	0,097895	0,196819
150,000	-0,770	0,089	-0,393652	0,045658	0,396220	0,191587	0,098024
180,000	-0,562	0,062	-0,430797	0,047206	0,385445	0,198108	-0,109936
210,000	-0,356	0,043	-0,363817	0,043631	0,223627	0,139569	-0,229164
240,000	-0,172	0,033	-0,207685	0,039881	0,040169	0,069027	-0,177983
270,000	0,000	0,030	0,000000	0,038376	-0,038376	0,038376	0,000000
300,000	0,172	0,033	0,207685	0,039881	0,040169	0,069027	0,177983
330,000	0,356	0,043	0,363817	0,043631	0,223627	0,139569	0,229164
360,000	0,562	0,062	0,430797	0,047206	0,385445	0,198108	0,109936

Tabla 5-3 Datos de fuerzas en los álabes del VSP

Para la obtención de estos datos primero se ha partido de los datos iniciales explicados anteriormente y con la ayuda de ecuaciones se ha conseguido relacionar todos los términos entre sí. Primero se va a explicar los cálculos seguidos para calcular todos los datos de la tabla de ángulos y velocidades.

Primeramente, se ha obtenido el cálculo de φ de la siguiente manera. Partimos de:

$$tan\varphi = \frac{sin\theta - e}{cos\theta}$$

Despejando:

$$\varphi = atan\frac{sin\theta - e}{cos\theta}$$

El primer problema encontrado, surge de asignar el ángulo correcto en base a los resultados de $tan\varphi$ obtenidos, puesto que para un mismo valor de la tangente, hay dos valores del ángulo. Para solventarlo, se calculan también los senos y cosenos de φ en ecuaciones trigonométricas que se obtienen de la figura 5-2. Del triángulo OCA se pueden sacar dos ecuaciones de cierre:

$$Rcos\theta = CA\ cos\varphi\ (1)$$

$$Rsen\theta = OC + CA\ sen\varphi\ (2)$$

Del teorema de los triángulos generales se saca también una tercera ecuación:

$$(CA)^2 = R^2 + (OC)^2 - 2R \cdot OC \cdot sen\theta$$

Dividiendo entre el radio R:

$$\frac{(CA)^2}{R^2} = \frac{R^2 + (OC)^2 - 2R \cdot OC \cdot sen\theta}{R^2}$$

Sabiendo que OC/R es igual a e(excentricidad), y despejando CA:

$$CA = R\sqrt{1 + e^2 - e \cdot sen\theta}$$

Combinando esta última ecuación obtenida con la ecuación (1) y (2), obtendremos las ecuaciones que definen al seno y coseno de φ:

$$cos\varphi = \frac{R}{CA}cos\theta$$

$$sen\varphi = \frac{R(sen\theta - e)}{CA}$$

Dividiendo el seno entre el coseno, se obtiene la tangente del ángulo, con la misma fórmula que teníamos al principio, prueba de que es correcto el desarrollo.

$$\frac{sen\varphi}{cos\varphi} = \frac{R \cdot CA \cdot (sen\theta - e)}{R \cdot CA \cdot cos\theta}$$

$$tan\varphi = \frac{sin\theta - e}{cos\theta}$$

El siguiente parámetro a calcular es la velocidad de arrastre, o V_R, con las siguientes fórmulas:

$$V_R cos\psi = -\omega R \cdot sin\theta + V_A$$

$$V_R sen\psi = \omega R \cdot cos\theta$$

Una vez obtenidos, se trata de hallar la forma de calcular V_R y ψ. Para ello primero calcularemos V_R elevando al cuadrado las dos ecuaciones y sumándolas, para que así el término del ángulo ψ se quite.

$$V_R^2 = \omega^2 R^2 sen^2\theta - 2V_A \omega R sen\theta + V_A^2 + \omega R^2 cos^2\theta$$

Simplificando y despejando V_R:

$$V_R = \sqrt{V_A^2 - 2V_A \omega R sen\theta + \omega^2 R^2}$$

Para el cálculo del ángulo ψ, bastará con hacer el cociente de $V_R sen\psi$ / $V_R cos\psi$, y aplicar el comando de Excel "ATAN2", el cual nos dará el ángulo perteneciente a los dos datos que le demos, y además de eso le establecemos una condición por la cual si un ángulo es negativo se le sumarán 360 grados, de esta manera siempre tendremos el ángulo ubicado de forma correcta en el círculo trigonométrico.

Una vez realizados todos los cálculos anteriores, sólo nos falta por hallar el valor del ángulo de ataque para las diferentes posiciones del álabe a lo largo de una vuelta completa del rotor. Para ello, tenemos una ecuación que relaciona los ángulos calculados anteriormente con el de ataque.

$$\alpha = \psi - (90 + \varphi)$$

Ya calculados los ángulos y velocidades para la tabla 5-2, se procede a calcular las fuerzas y coeficientes pertenecientes a la tabla 5-3. Se parte inicialmente de las fórmulas para el cálculo de los coeficientes de sustentación y de arrastre.

$$C_L = 0{,}1\alpha$$

$$C_D = 0{,}03 + 0{,}1C_L^2$$

Con estas dos fórmulas se obtienen los valores de los coeficientes para las diferentes posiciones de los álabes a lo largo de su rotación. Con los coeficientes calculados, se procede ahora a la obtención de las fuerzas de sustentación y de arrastre.

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A V_R^2$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho A V_R^2$$

Una vez calculadas para todos los θ, se proceden a calcular las fuerzas restantes.

$$T = L \cdot sen\psi - D \cdot cos\psi$$

$$\frac{Q}{R} = L \cdot \cos(\psi - \theta) + D \cdot sen(\psi - \theta)$$

$$F = L \cdot cos\psi - D \cdot sen\psi$$

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado del trabajo se van a detallar las conclusiones que he extraído al finalizar el TFG, y perfilar alguna posible línea futura que continúe el trabajo realizado sobre este propulsor.

6.1 Conclusiones

El trabajo final de grado ha sido un proyecto que desde el principio se me hizo muy interesante, aunque sabía que me iba a dedicar mucho tiempo y esfuerzo el conseguir todos los objetivos del mismo a tiempo. Sin embargo, hay muchas conclusiones que me gustaría señalar aquí en varios apartados, cada uno referido a una parte diferente del TFG.

6.1.1 Conclusiones sobre la utilización del software de CAD y simulación de movimiento de Siemens NX

El software de modelado geométrico NX es un programa que ya había utilizado previamente durante mis años en la Escuela Naval Militar. Es por lo tanto, un programa que no me es desconocido y sobre el que tenía un conocimiento básico de su uso. No obstante, para la realización de algunas geometrías de las piezas he podido aprender sobre herramientas de diseño que no conocía previamente. En concreto, el diseño de los álabes ha sido algo sobre lo que me ha sido muy útil aprender, el hecho de saber como se pueden importar coordenadas de diseños normalizados y realizar un barrido de curvas para crear piezas en 3D de geometría variable me ha parecido algo digno de retener en la memoria para un futuro.

Por otra parte, con el módulo de simulación de movimiento del programa apenas he tenido contacto. He tenido que realizar un proceso de aprendizaje basado en tutoriales del programa y de investigadores externos a Siemens para poder comprender el funcionamiento de cada una de las opciones para poder alcanzar el movimiento deseado. El resultado obtenido ha sido satisfactorio pues he podido realizar una animación de un movimiento, a mi parecer, bastante complejo.

6.1.2 Conclusiones sobre la utilización del software de Ansys

Así como el programa de Siemens NX no me era del todo desconocido, con el Ansys era algo totalmente diferente. Nunca había trabajado con software de simulación CFD hasta empezar a trabajar en este TFG, por lo que el proceso de aprendizaje ha sido algo más lento. Sin embargo, con la ayuda de tutoriales sobre las partes del programa que necesita aprender a usar he conseguido un entendimiento

suficiente del entorno, aunque se que este software tiene múltiples aplicaciones y métodos de resolución más, aparte del que he escogido para resolver el análisis hidrodinámico de este trabajo.

Aún así, estoy satisfecho con el trabajo realizado porque he podido ver en los resultados del programa los datos que había obtenido de forma analítica, algo que he de admitir que ha supuesto una gran satisfacción personal.

6.1.3 Conclusiones sobre todo el proceso de realización del TFG

En conclusión, sobre todo lo realizado en este trabajo, he de decir que en un principio no esperaba ser capaz de conseguir todos los objetivos que se proponían, puesto que había varios campos sobre el TFG que no dominaba incluso alguno sobre el cual nunca había trabajado. Sin embargo, con la dedicación adecuada y la guía de mi tutor, he conseguido que me apasione la realización de este trabajo.

6.2 Líneas futuras

El tema que plantea este TFG, que es el estudio del propulsor Voith-Schneider, es un campo que en España no se ha tratado con demasiada profundidad, algo que he podido comprobar en la casi inexistencia de documentación española sobre estudios numéricos del propulsor. Sin embargo, una vez que se comprenden los funcionamientos del VSP, se puede ver que hay muchas investigaciones que se pueden realizar sobre el propulsor. Señalaré algunas que, en mi opinión, pueden ser de interés, continuando con el trabajo ya realizado:

- Análisis hidrodinámico del propulsor Voith-Schneider en 3D, considerando la posibilidad de simulación en un entorno realista con oleaje.
- Impresión en 3D del modelado geométrico realizado en este TFG para implantarlo en una embarcación para realizar pruebas de navegación con él, y comparar los datos experimentales obtenidos con los que se tienen del simulador Fluent.
- Estudio de cavitación del propulsor Voith-Schneider.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] B. Modelle, «bauer-modelle.de,» [En línea]. Available: http://bauer-modelle.de/shop/401275/83512/0/voith-schneider-propeller/voith-schneider-propeller-vsp65-bm. [Último acceso: 20 Enero 2017].

[2] N. Geographic, «nationalgeographic.com,» [En línea]. Available: http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/los-barcos-de-los-faraones_8270/3. [Último acceso: 20 Enero 2017].

[3] B. Gipuzkoa, «bertan.gipuzkoakultura.net,» [En línea]. Available: http://bertan.gipuzkoakultura.net/23/caste/16.php. [Último acceso: 22 Enero 2017].

[4] «tecnologia-maritima.blogspot.com,» [En línea]. Available: http://tecnologia-maritima.blogspot.com.es/2015/07/propulsion-por-rueda-de-paletas.html. [Último acceso: 22 Enero 2017].

[5] J. A. R. Ponce, «riull.ull.es,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: http://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1240/SISTEMAS%20DE%20PROPULSION%20Y%20CLASIFICACION%20DE%20BUQUES.pdf?sequence=1. [Último acceso: 23 Enero 2017].

[6] «Wikipedia,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/CODAD. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[7] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/COGAG. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[8] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/COGOG. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[9] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/CODLAG. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[10] «Research Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/264353036_fig1_Figure-1-CODAG-above-7-and-CODOG-below-8-COGAG-combined-gas-and-gas-turbine. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[11] «teignbridge.es,» [En línea]. Available: http://teignbridge.es/wp-content/uploads/sites/6/2014/02/Aquafoil.jpg. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[12] J. M. d. l. Calle, Propulsores marinos, Oviedo: Universidad de Oviedo publicaciones, 1997.

[13] «Atmosferis,» [En línea]. Available: http://www.atmosferis.com/helices-con-tobera/. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[14] «Seserisa,» [En línea]. Available: http://seserisa.blogspot.com.es/2013/06/toberas-valvulas-y-difusores.html. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[15] «Sector marítimo,» [En línea]. Available: https://sectormaritimo.es/diez-propulsores-usados-en-el-mundo-naval. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[16] «Clamp,» [En línea]. Available: http://www.clamp.es/index.php/hidrojets/hamiltonjet/como-funciona-un-hidrojet. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[17] «Military factory,» [En línea]. Available: http://www.militaryfactory.com/ships/detail.asp?ship_id=USS-Independence-LCS2. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[18] «Sistemar,» [En línea]. Available: http://sistemar.sarein.com/H%C3%A9licesCLT/Fundamentoste%C3%B3ricos/tabid/205/language/es-ES/Default.aspx. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[19] «Sistemar,» [En línea]. Available: http://sistemar.sarein.com/H%C3%A9licesCLT/Ventajas/tabid/206/language/es-ES/Default.aspx. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[20] R. C. Álvarez, «Sistema de propulsión podded (AZIPOD),» *Revista de prácticos de puerto,* nº 64, Diciembre 2010.

[21] «Diario de náutica,» [En línea]. Available: http://www.diariodenautica.com/fotos/1/uploads/2014/05/JuancarlosI.jpg. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[22] T. Veikonheimo, «Giro decisivo,» *ABB,* nº 1, p. 6, 2003.

[23] «darafarisub.blogspot.com,» [En línea]. Available: http://darafarisub.blogspot.com.es/2010/02/la-sorpresa-del-13-de-febrero-y-eso-que.html. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[24] J. Van Manen, A New Way of Simulating Whale Tail Propulsion, The Nederlands: WhaleTail Depelopment, 2008.

[25] D. D. Jürgens, Cycloidal Propulsion - The quiet maneuvering propulsion for large motor yachts, Amsterdam: Voith Turbo Marine GmbH & Co., 2004.

[26] A. F. Molland, Ship resistance and propulsion, Southampton: Cambridge University Press, 2011.

[27] E. Esmailian, «Numerical investigation of the permormance of Voith Schneider propulsion,» *American Journal of Marine Science,* vol. 2, nº 3, p. 5, 2014.

[28] D. Industry, «directindustry.es,» [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/beta-utensili/product-16269-281303.html. [Último acceso: 03 02 2017].

[29] Airfoil Tools, «airfoiltools.com,» [En línea]. Available: http://airfoiltools.com/plotter/index. [Último acceso: 5 Febrero 2017].

[30] P. Binde, Simulations with NX, Munich: Hanser, 2014.

[31] R. A. Repetto, Ansys Fluent Advanced Workshop, Ansys, Inc., 2016.

[32] J. P. Ghose, Basic Ship Propulsion, Nueva Delhi: Allied Publishers, 2004.

[33] «Da tu opinión,» [En línea]. Available: http://www.datuopinion.com/codag. [Último acceso: 26 Enero 2017].

[34] «Voith,» [En línea]. Available: http://www.voith.com/en/products-services/power-transmission/vsp-voith-schneider-propeller-10002.html. [Último acceso: 27 Enero 2017].

[35] «La Gaceta,» *El cazaminas Tajo rescata un velero que se hundía*, p. 1, 27 Junio 2015.

[36] Voith, «Interactive Voith-Schneider Propeller program,» Voith, [En línea]. Available: http://www.voith.com/en/products-services/power-transmission/vsp-voith-schneider-propeller-10002.html. [Último acceso: 5 Febrero 2017].