

GRADO EN MARINA

# TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y FABRICACIÓN A  
ESCALA DE UN BUQUE GASERO CON DISTINTAS  
PROAS***

**Alumno:** García Pulgarin, Hegoi

**Director:** López Arraiza, Alberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Portugalete, 10/ 02/ 2020



## Agradecimientos

Quiero agradecer su ayuda para la realización del presente trabajo fin de grado a mi familia, a mis seres queridos como Zuriñe Hernández y Omar Parrazar y a mis amigos Andrea González, Unai García, Yeray Cirión, Lander Solana, Gorka González y Borja Villalba por el apoyo y el ánimo recibido en los malos momentos.

También quisiera agradecer a mi tutor del trabajo Alberto López por la paciencia y por la orientación durante el desarrollo de este trabajo.

Por último, también agradezco a Mecanizados Larr 2008, por todo el soporte prestado para la fabricación del buque, ya que, sin su cooperación no lo podría haber llevado a cabo.



## Resumen

Mediante este trabajo se ha desarrollado el estudio hidrodinámico de un buque gasero de  $L=360$  m de eslora, aplicándole modificaciones en la proa y analizando la resistencia al avance y el comportamiento en la mar mediante el programa de arquitectura naval y diseño de buques *Maxsurf*.

Se ha obtenido una disminución del 2,43% en la resistencia al avance y potencia efectiva del buque con la proa tipo invertida frente al buque con bulbo. También se ha observado una mejora en el comportamiento del buque con proa invertida realizando ensayos con olas de entre 4 y 6m de altura y frecuencia de 0,601 rad/s y 0,999 rad/s.

Una vez terminado el estudio, se ha llevado a cabo el análisis de los respectivos procesos de fabricación a escala del buque con distintas proas mediante el apartado CAM del software *Fusion 360*. Se ha observado que para la fabricación del buque con bulbo se necesita la fabricación de utillajes específicos, así como un mayor número de paradas de máquina para el cambio de herramienta. Finalmente, se ha utilizado un centro de mecanizado de tres ejes para la obtención del modelo a escala (1:1000) en aluminio (calidad 5083 H111) del buque con el nuevo diseño de proa invertida, para lo que se han empleado 14 horas de tiempo en máquina.

Palabras clave: Buque gasero, hidrodinámica, fresado, CNC.

## Laburpena

Lan honen bitartez 360 m-ko gasa garraiatzen duen ontzi baten ikerketa hidrodinamikoa garatu da, brakan aldaketak eginez eta aurrerapenerako erresistentzia eta itsasoan duen joera aztertu egin da itsas arkitektura eta ontzi diseinurako erabilitako *Maxsurf* programa erabiliz.

Ontziaren aurrerapenaren eta potentzia eraginkorraren erresistentzian %2,43ko beherakada lortu da braka alderantzikatuta duen ontzia bestearekin konparatuz. Braka alderantzikatuta duen ontziaren portaera hobetu da, 4 eta 6 m arteko altuera duten olatuak eta 0,601 rad / s eta 0,999 rad / s maiztasuna duten olatuekin egin dira ikerketak.

Azterketa bukatuta, braka alderantzikatua duen ontziaren fabrikazio-prozesuen analisia *Fusion 360* programaren CAM atalaren bidez egin da. Braka (con bulbo) duen ontzia fabrikatzeko erreminta espezifikoak behar dira eta erreminta aldatzeko makinak geldialdi kopuru handiagoa egin behar ditu. Azkenik, hiru ardatzetako mekanizazio zentroa erabili da, ontzia aluminioz (5083 H111 kalitatea) egin da, ontziaren eskala erdua (1: 1000) lortzeko. Makinak 14 ordu erabili behar izan ditu.

Hitz gakoak: gas-ontzia, hidrodinamika, fresaketa, CNC.

## Abstract

Through this work, the hydrodynamic study of a gas ship of  $L= 360$  m length has been developed, applying modifications to the bow and analyzing the resistance to the advance and the behavior in the sea by means of the program of naval architecture and design of ships *Maxsurf*.

A decrease of 2.43% in the resistance to the advance and effective power of the ship with the bow type inverted in front of the ship with bulb has been obtained. An improvement in the behaviour of the ship with the bow inverted has also been observed by carrying out tests with waves of between 4 and 6m in height and a frequency of 0.601 rad/s and 0.999 rad/s.

Once the study was completed, the analysis of the respective manufacturing processes at ship scale with different bows was carried out using the CAM section of the *Fusion 360* software. It has been observed that the manufacture of the ship with bulb requires the manufacture of specific tools, as well as a greater number of machine stops for tool change. Finally, a three-axis machining centre has been used to obtain the scale model (1:1000) in aluminium (quality 5083 H111) of the ship with the new inverted bow design, for which 14 hours of machine time have been spent.

Keywords: LNG carrier, hydrodynamics, milling, CNC.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Programas de diseño 3D.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Programas de diseño naval .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Canales de ensayos hidrodinámicos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4 Procesos y máquinas de mecanizado por arranque de viruta .....</b>	<b>6</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>4. DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 Diseño de las formas del casco en 3D .....</b>	<b>10</b>
4.1.1 Diseño preliminar de los cascos .....	10
<b>4.2 Estudio hidrodinámico .....</b>	<b>13</b>
4.2.1 Maxsurf Modeller .....	13
4.2.2 Maxsurf Resistance .....	16
4.2.3 Maxsurf Motions .....	21
<b>4.3 Fabricación mecánica .....</b>	<b>26</b>
4.3.1 Herramientas utilizadas .....	27
4.3.2 Utensilio de herramienta .....	29
4.3.3 Utensilio de amarre .....	29
4.3.4 Proceso de fabricación .....	29
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Referencias .....</b>	<b>47</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>48</b>
<b>Anexo 1 Especificaciones técnicas de la máquina .....</b>	<b>48</b>



Anexo 1.1 Disposición de la máquina .....	48
Anexo 1.2 Especificación de la máquina .....	49
Anexo 1.3 Accesorios estándar y opcionales .....	51
Anexo 1.4 Dimensiones externas .....	52
<b>Anexo 2 Especificaciones de seguridad.....</b>	<b>53</b>

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Centro de mecanizado Hyundai Wia F500 Plus .....	8
Ilustración 2: Vista del plano Horizontal de la cubierta principal .....	10
Ilustración 3: Vista del plano vertical del buque.....	11
Ilustración 4: Vista Isométrica del casco de proa invertida sin superficies .....	11
Ilustración 5: Diseño final del casco del buque con proa invertida .....	12
Ilustración 6: Diseño final del buque con proa invertida y su respectiva superestructura.	13
Ilustración 7: Calados para los buques con proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha) .....	14
Ilustración 8: Volumen del área mojada del buque con proa invertida .....	16
Ilustración 9: Volumen del área mojada del buque con bulbo en la proa .....	16
Ilustración 10: Potencia vs Velocidad buque con proa invertida (Izda) con bulbo (Dcha)	20
Ilustración 11: Resistencia vs Velocidad buque con proa invertida (Izda) con bulbo (Dcha)	20
Ilustración 12: Estela del buque con proa invertida .....	21
Ilustración 13: Estela del buque con bulbo en la proa .....	21
Ilustración 14: Seccionado el buque con proa invertida en 41 cuadernas .....	22
Ilustración 15: Animación del ensayo 4 del buque con proa invertida .....	26
Ilustración 16: Animación del ensayo 4 del buque con bulbo en la proa .....	26
Ilustración 17: Fresa plana específica para aluminio de Ø16mm .....	28
Ilustración 18: Fresa esférica específica para aluminio Ø5mm .....	28
Ilustración 19: Módulo de superficies del software Fusion 360 .....	31
Ilustración 20: Vistas isométricas de los buques proa invertida (Izda) y bulbo en la proa (Dcha) con las superficies orientadas.....	31

Ilustración 21: Vista del plano generado a 10 mm.....	32
Ilustración 22: Vista lateral de las superficies nuevas generadas .....	33
Ilustración 23: Simulación de la herramienta sin superficie y con superficie generada respectivamente en la proa con bulbo .....	33
Ilustración 24: Simulación de la herramienta sin superficie y con superficie generada respectivamente en la proa invertida.....	34
Ilustración 25: Alzado y perfil del útil para la 2ª fase.....	34
Ilustración 26: Meso del centro Hyundai F500 Plus con la orientación de sus ejes .....	35
Ilustración 27: Módulo de fabricación del Fusion 360 .....	35
Ilustración 28: Fase 1 del proceso de fabricación .....	36
Ilustración 29: Fase 2 del proceso de fabricación .....	37
Ilustración 30: Fase 3 del proceso de fabricación .....	38
Ilustración 31: Fase 4 del proceso de fabricación .....	39
Ilustración 32: Simulación de la proa invertida (Izda) y proa con bulbo (Dcha).....	39
Ilustración 33: Fase útil 2 del proceso de fabricación.....	40
Ilustración 34: Fase 1 del proceso de mecanizado .....	41
Ilustración 35: Fase útil 1 del proceso de mecanizado.....	41
Ilustración 36: Fase 2 del proceso de mecanizado .....	42
Ilustración 37: Fase 3 del proceso de mecanizado .....	43
Ilustración 38: Fase útil 2 del proceso de mecanizado y como quedaría la pieza sujeta ...	43
Ilustración 39: Buque finalizado parte lateral .....	44
Ilustración 40: Buque finalizado parte interior .....	44

## Índice de tablas

Tabla 1: Cálculos hidrostáticos del buque con proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha). 15	
Tabla 2: Cálculos hidrostáticos mediante el método Holtrop de la proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha).....	18
Tabla 3: Resultados mediante el método Holtrop .....	19
Tabla 4: Certificado de calidad del Aluminio utilizado.....	30





# 1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se ha realizado el diseño, estudio hidrodinámico, y la fabricación mediante mecanizado por arranque de viruta de un buque gasero a escala (E 1:1000) y con distintas proas.

En primer lugar, se han diseñado 2 cascos con diferentes proas, para ello se ha utilizado el apartado de CAD del programa *Fusion 360* [1]. Una vez diseñadas las proas, se han exportado al programa *Maxsurf* [2] con el objetivo de realizar su estudio hidrodinámico, resistencia al avance y comportamiento en la mar.

Mediante el programa *Maxsurf Resistance* [2], se estudia la resistencia al avance de los distintos diseños, así como la potencia necesaria para su propulsión. Además, se realiza un estudio de comportamiento en la mar con *Maxsurf Motions* [2] imponiendo distintas condiciones de frecuencia y tamaño de oleaje.

Por último, se fabricará uno de los buques estudiados a escala, éste será elegido una vez realizados los procesos de fabricación. Para ello, primero se utiliza el apartado CAM del programa *Fusion 360* para establecer la estrategia de mecanizado más adecuada. Posteriormente, se selecciona el material, las herramientas óptimas, el sistema de amarre y finalmente, se procede a su fabricación en un centro de mecanizado de tres ejes.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de los diferentes programas informáticos que se utilizan para diseño 3D y mecanizado y también, los utilizados para realizar cálculos hidrodinámicos. Igualmente se explican las distintas máquinas y procesos de mecanizado por arranque de viruta.

### 2.1 Programas de diseño 3D

Hoy en día en la industria se usa un abanico muy amplio de programas de diseño 3D, desde programas más básicos hasta programas más completos que ofrecen una mayor cantidad de módulos como por ejemplo, diseño, fabricación o renderizado. La selección del programa a utilizar depende principalmente de las necesidades del propio diseño, como pueden ser: diseño estético, análisis estructural, fluidodinámica o diseño para mecanizado.

Por ejemplo, el programa *Unigraphics* [3] o también conocido como “NX”, de la marca *Siemens* [3], es uno de los programas más conocidos y utilizados, sobre todo en el sector del automóvil, tanto para diseñar las partes del coche, como para ingeniería inversa, que consiste en hacer el diseño de los troqueles para fabricar dichas piezas. Dentro de los distintos módulos que lleva el programa, el más utilizado es el del CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) o fabricación asistida por ordenador, por lo que muchas empresas que se dedican al mecanizado de piezas lo usan.

Otro programa muy conocido y también muy utilizado por su versatilidad por todos los módulos que tiene es *Catia* de *Dassault Systems* [4], es uno de los que predomina en el sector aeronáutico por su gran capacidad a la hora del diseño por superficies, por eso mismo también tiene un espacio en el sector de la troquelería.

Otro de los programas más versátiles, es *SolidWorks* [5]. Se utiliza en varios sectores por su facilidad a la hora de diseñar piezas y poder ensamblarlas, además dispone de un módulo de CAM, también de fácil utilización. Todo esto con un precio más económico hace de este programa una buena opción para muchas empresas.

También hay programas menos polivalentes que los anteriormente mencionados, pero muy conocidos en sus sectores, en los que se han dado a conocer, por ejemplo, *Tebis* [6], muy utilizado en el apartado de mecanizado por ordenador y *AutoCAD* [1] que también es el más utilizado a la hora del diseño de planos en 2D.

Por último, *Fusion 360*, programa de *AutoDesk* [1], y el seleccionado para la realización de este proyecto, cuenta con muchos módulos de trabajo, como: el diseño 3D, el mecanizado de piezas, diseño de planos 2D, estudio de resistencia de los materiales...Es un programa en desarrollo a un precio muy económico, teniendo alguna limitación con respecto a los mencionados anteriormente a la hora del desarrollo de superficies o estrategias de mecanizado por ejemplo. Aunque una buena opción para dar los primeros pasos en este tipo de software por su coste, su fácil uso y por tener una curva de aprendizaje pronunciada.

## 2.2 Programas de diseño naval

Para el diseño naval, los programas utilizados son más específicos, entre éstos se encuentran *Foran* [7], *Cintranaval* [8] y *Maxsurf*, con los que se pueden hacer estudios de resistencia al avance, estabilidad y comportamiento en la mar, así como cálculos estructurales y los planos de taller.

El software *Foran* de la empresa *Sener* [7], es un programa CAD/CAM/CAE que engloba desde el diseño, permitiendo la realización de modelos virtuales 3D con alto detalle, hasta la fabricación del buque gracias a sus diferentes módulos. Este software español es el precursor en el sector naval, debido a esto y a su anticipación a las necesidades del mercado es

actualmente un referente internacional. En 2018 *Sener* lanzó una nueva versión mejorada del programa, *V80R3.0*, mediante la cual promete un diseño más rápido y eficiente de los buques además de un aumento del rendimiento, añadiendo accesos directos a módulos y usos simultáneos de varios comandos entre otros avances.

Respecto al software *Cintranaval*, lo ha desarrollado el grupo empresarial *Defcar* [8]. Se trata de un grupo de cuatro empresas españolas con 54 años de experiencia y una estrecha colaboración, las cuales se centran en el diseño de buques y software marino CAD/CAM, hidrodinámica y propulsión de buques, consultoría y coordinación de proyectos. El software de *Defcar* consta de una gran variedad de módulos, siendo independientes unos de otros, pero trabajando con todos ellos se puede llevar a cabo la producción completa de un buque.

*Maxsurf* es el programa de diseño naval seleccionado para este trabajo fin de grado ya que es el programa académico utilizado en el Grado en Marina y en el Grado en Náutica y Transporte Marítimo. Se ha utilizado para realizar los cálculos de resistencia al avance, y comportamiento en la mar. En definitiva, *Maxsurf* proporciona la información necesaria para saber qué geometría de casco del buque, de entre los estudiados, es el más conveniente desde el punto de vista hidrodinámico.

Dicho software dispone de distintos módulos para llevar a cabo todas las fases del proceso de diseño de un buque. , Incluye el modelado de todo tipo de cascos (módulo *Modeler* [2]) de una manera sencilla e intuitiva mediante la unión, corte y manipulación de un número ilimitado de superficies con el fin de crear un casco optimizado de forma rápida y precisa, la información de la estabilidad (módulo *Stability* [2]) que se obtiene de una manera rápida, gráficamente y con el cálculo interactivo de la estabilidad intacta o dañada con el que se puede manejar todo tipo de estabilidades y cálculos de fuerza, predicción por parte de los diseñadores de los movimientos del buque (módulo *Motions*) con diferentes estados de la mar y analizar estos datos de modo rápido y fiable, con el que se puede especificar el espectro de onda, el rumbo, la velocidad del barco y otros parámetros, la obtención de los parámetros de resistencia y potencia (módulo *Resistance*) usando para ello diferentes métodos dependiendo del tipo de barco a estudiar, definir la ubicación de partes estructurales del buque (módulo *Structure* [2]) como placas del casco, largueros, cubiertas y otros tipos de elementos obteniendo un ahorro del peso



y el análisis estructural (módulo *Multiframe* [2]) para determinar las tensiones y cumplir con los requisitos de cada clase y optimizarlo para la fuerza y el peso basándose en análisis estáticos o dinámicos.

## 2.3 Canales de ensayos hidrodinámicos

Una vez estudiado y seleccionado el diseño final del buque y antes de enviar los planos constructivos al astillero, se suele fabricar un modelo a escala para su prueba en un canal de ensayos para ratificar los cálculos obtenidos por ordenador. De ahí el interés del presente trabajo fin de grado, donde se estudia la estrategia más adecuada para la fabricación de distintos cascos mediante mecanizado por arranque de viruta.

Los modelos a escala del buque se ensayan en diferentes tipos de canales, como pueden ser:

- Los canales de agua circulante [9], en los que el modelo se encuentra fijo y en reposo a un soporte anclado en la pared y el fluido circula alrededor del modelo mediante una bomba.
- Los tanques de remolque [10], en los que el modelo está sujeto a un carro de acero el cual se mueve mediante unas ruedas por unas guías ancladas a los lados del canal.

A su vez, los canales se pueden clasificar dependiendo de la profundidad y la agitación del agua:

- Los canales de aguas poco profundas [11], en los que se optimiza el rendimiento y el comportamiento del barco.
- Canales de aguas tranquilas [10], en los que se hacen las pruebas de los modelos y de las estructuras de los barcos en aguas tranquilas.
- Canal offshore se realizan las operaciones en alta mar y maniobras [11].
- En la cuenca marítima y de maniobras [11] se verifica el rendimiento y la seguridad del barco.
- En el túnel de cavitación [9] se hacen las pruebas de cavitación de los elementos de propulsión.

La elección de un tipo u otro de canal de pruebas se realiza de acuerdo a las condiciones de navegación del buque durante su vida en servicio

## 2.4 Procesos y máquinas de mecanizado por arranque de viruta

El mecanizado por arranque de viruta consiste en la eliminación de material para la fabricación de la pieza deseada.

Existen varios procesos [[12](#)], [[13](#)] para la obtención de una pieza final mediante el mecanizado por arranque de viruta entre los que podemos encontrar:

- Taladrado, consistente en la realización de agujeros mediante una broca.
- Serrado, se trata del proceso mediante el cual se realiza el corte de la pieza usando una hoja de sierra.
- Limado, en el cual, utilizando una lima se arranca viruta con el que se da el acabado final a la pieza.
- Brochado, se utiliza para tallar una forma determinada en la pieza por el paso de una herramienta con múltiples filos.

- Mortajado, es un proceso con el que se generan superficies planas y ranuras mediante un movimiento de translación con una herramienta monofiló.

Además de los procesos arriba mencionados también existen:

- Torneado, que consiste en el mecanizado creando una superficie de revolución en el que el movimiento de la herramienta es paralelo al eje de la pieza, este proceso puede ser manual o gobernado por CNC.
- Fresado, que junto al torneado es el método más utilizado y en el que sus máquinas han tenido una mayor evolución, las fresadoras han pasado de los 3 ejes del comienzo a los 5 ejes que tienen hoy en día y como el torneado pueden ser manuales o por control CNC.

En la actualidad, la dirección que están tomando los nuevos tornos y fresadoras está siendo la unión entre ambas, las llamadas máquinas multifunción, ya que gracias a ellas se ahorra tiempo de mecanizado al hacer en una sola máquina las operaciones de las dos.

Para este proyecto, la máquina utilizada ha sido un centro de mecanizado vertical *Hyundai Wia F500 Plus* [14], (figura 1) que usa conos BT40, con una cantidad de revoluciones máximas de 8000 RPM, una mesa de tamaño 1200 x 500 mm con la posibilidad de moverse hasta 1060 x 410 x 635 mm y un cargador para 30 herramientas.



*Ilustración 1: Centro de mecanizado Hyundai Wia F500 Plus*

El centro de mecanizado utiliza un control CNC *Fanuc* [15] serie i con el que se puede hacer una simulación de los movimientos a realizar por las herramientas.

### 3. OBJETIVOS

Los principales objetivos de este trabajo fin de grado son los siguientes:

- Diseño de distintas geometrías de proas para un buque gasero de 360 metros de eslora mediante un programa CAD.
- Estudio hidrodinámico comparativo de las distintas proas diseñadas, es decir, resistencia al avance, potencia necesaria y comportamiento en la mar, mediante el programa de diseño naval *Maxsurf*.
- Selección del material y el proceso de mecanizado para su fabricación a escala.
- Estudio de la mejor estrategia de mecanizado y fabricación final de la proa seleccionada a escala con fresadora CNC de 3 ejes.

## 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se explica el método utilizado para el modelado de los diferentes cascos del buque, una vez obtenidos éstos, se explica el estudio hidrodinámico realizado con en el programa *Maxsurf* Finalmente, analizando los datos recopilados, se explica el método de fabricación y la estrategia de mecanizado llevada a cabo para los distintos modelos a escala.

### 4.1 Diseño de las formas del casco en 3D

#### 4.1.1 Diseño preliminar de los cascos

Para el modelado 3D de los buques se ha utilizado el módulo de superficies del programa de diseño *Fusion 360*. Dentro de éste hay que seleccionar el plano de trabajo deseado para poder comenzar con el boceto.

Para llevar a cabo el diseño se ha optado por crear un *Sketch* inicial en el plano horizontal (Ilustración 2) y otro en el vertical (Ilustración 3), de éstos partirá la forma del buque. Para definir la manga y el calado, se crean la cantidad de planos que se desee, a mayor cantidad de éstos, mayor detalle conseguiremos en la superficie de trabajo, así como en los finos de proa y popa (Ilustración 4).

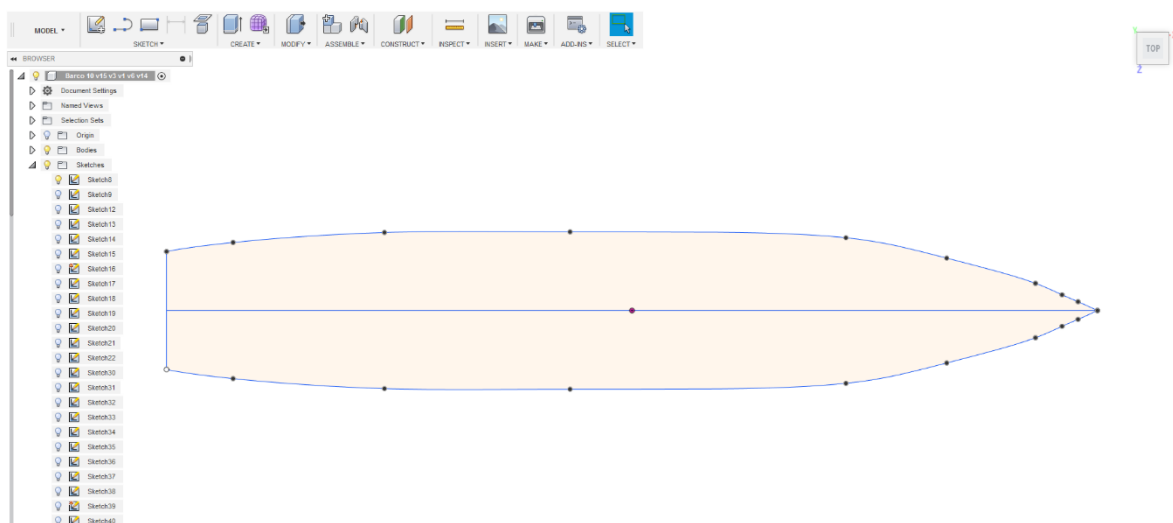
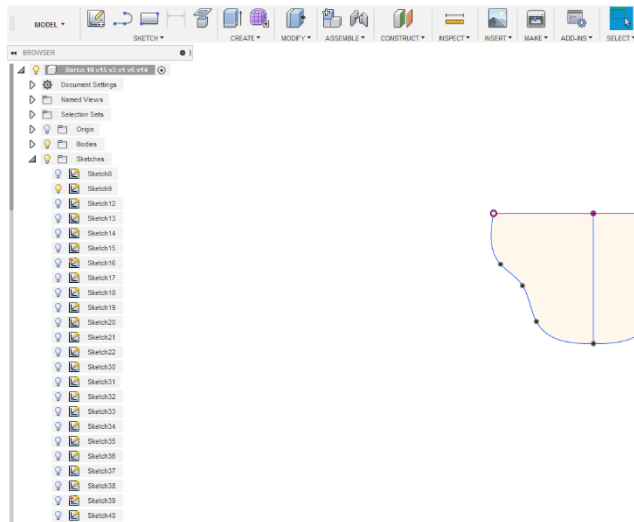
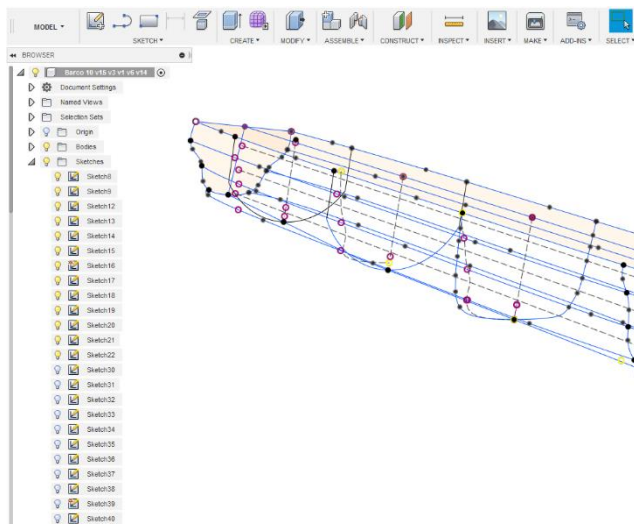


Ilustración 2: Vista del plano Horizontal de la cubierta principal

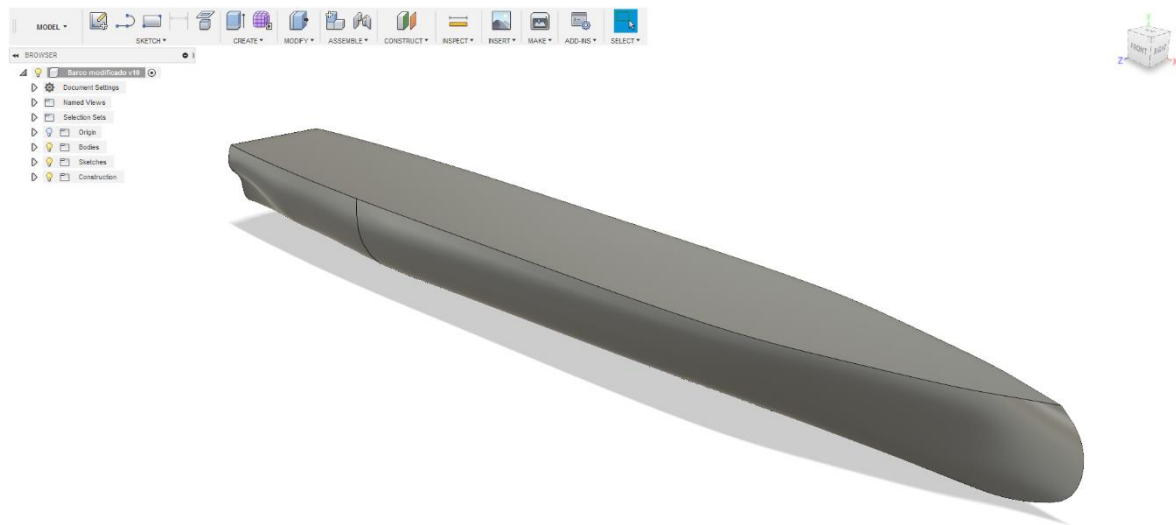


*Ilustración 3: Vista del plano vertical del buque*



*Ilustración 4: Vista Isométrica del casco de proa invertida sin superficies*

Con base en las líneas previamente creadas y utilizando el comando *Patch*, se crean las superficies de contacto, obteniendo así el casco y la cubierta principal del buque (Ilustración 5), donde posteriormente se añadirán el resto de las partes.



*Ilustración 5: Diseño final del casco del buque con proa invertida*

Sobre esta superficie se añadirán el resto de las partes del buque que se encuentran por encima de la cubierta principal, como son, el castillo de proa, la acomodación, el puente, el helipuerto y la zona de carga.

Para el diseño del castillo de proa, donde está la acomodación y el puente, el método ha sido muy similar a lo mencionado anteriormente. Se han creado diversos *Sketch* en diferentes planos y se ha creado la superficie, a la cual se le han hecho algunos vaciados, se obtiene así la superficie deseada.

Se ha creado un plano paralelo al plano *YZ* inicial para la zona de carga, en donde se ha dibujado un octógono, el cual se ha extruido sobre el plano longitudinal. La construcción del helipuerto se ha llevado a cabo mediante un plano paralelo a la cubierta principal con la forma deseada y extrayéndolo sobre el plano vertical.

En la ilustración 6 se puede observar el diseño final del buque con proa invertida junto con su respectiva superestructura, compuesta por el puente de mando en la parte superior, así como la sala de baterías que suministrará energía a los sistemas de ayuda a la navegación del puente en caso de ser necesario, además consta de dos alerones, uno a cada banda para facilitar el trabajo y la visibilidad de los oficiales de cubierta, zonas comunes y de ocio en la entreplanta además del CCR (*Cargo Control Room*), en la cubierta principal se encuentran los camarotes de la tripulación.



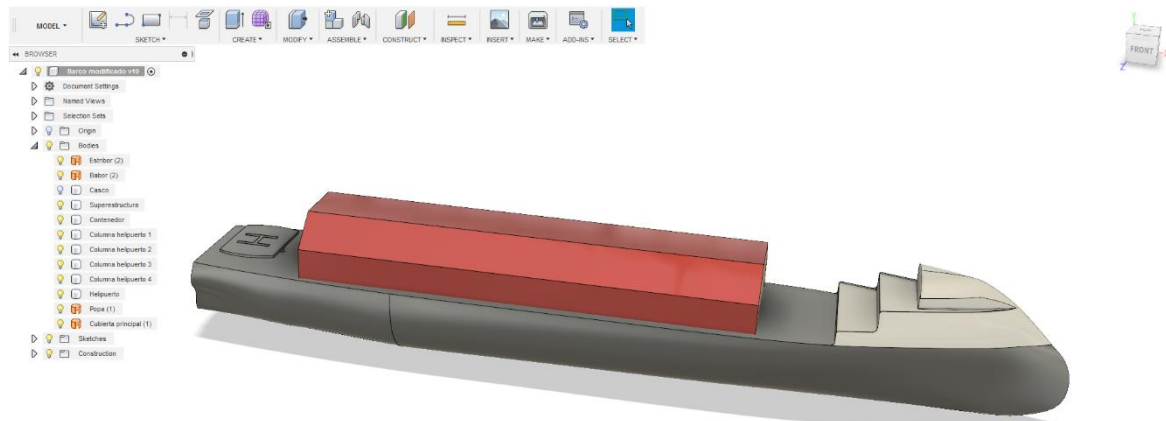


Ilustración 6: Diseño final del buque con proa invertida y su respectiva superestructura

## 4.2 Estudio hidrodinámico

El estudio hidrodinámico de las distintas proas se ha llevado a cabo mediante el software *Maxsurf*. Dentro de éste se han utilizado diversos módulos, como el *Maxsurf Modeller*, el *Maxsurf Resistance* y el *Maxsurf Motions*.

### 4.2.1 Maxsurf Modeller

Es el módulo principal del software *Maxsurf*, en él se pueden modelar cualquier tipo de superficie *NURB* [16] para el análisis hidrostático.

El programa dispone de diseños propios de distintos tipos de buques y elementos flotantes, pero también admite la importación de diseños realizados en otros programas. Esta segunda opción puede acarrear problemas dependiendo en qué formato y de qué forma se diseñen las superficies. Esto es debido a que el programa *Maxsurf* es capaz de abrir archivos *`.iges`*. Éste es un formato genérico de superficies que muchos programas de diseño son capaces de abrir y de guardar, pero que tiene como diferencia con los archivos específicos de cada programa, que pierde cierta información, tal como, el árbol de operaciones. Por esto y por haber sufrido algún “trimado” en su generación, puede ocurrir que al importar el archivo *`.iges`*, el programa *Maxsurf* genere algún tipo de irregularidad en la forma diseñada.

Debido a los problemas de importación del diseño generado en *Fusion 360* (Ilustración 6), se decide trabajar con la librería disponible del programa *Maxsurf Modeller* modificando la proa del diseño del casco *Vessel Cargo* para obtener una proa similar a la de la ilustración 6, denominada proa invertida.

Para la realización del presente TFG, se decide seleccionar un buque gasero disponible en la librería de *Maxsurf* el cual se modificará para estudiar su hidrodinámica y fabricación.

En los dos modelos se ha seleccionado el tipo de buque *Vessel Cargo* en uno de ellos se ha dejado el diseño original, siendo su proa con bulbo y en el otro diseño se ha realizado una modificación en la proa para obtener una proa tipo invertida cuya geometría es utilizada en buques *Offshore* y está comenzando a implementarse en superyates, actualmente existen pocos buques *Offshore* que cuenten con la mencionada proa, y son utilizados en zonas más específicas donde las condiciones meteorológicas y de mar, como puede ser el mar de *Barents*, hacen más difíciles las tareas que desempeñan los citados buques [17].

Una vez escogida la forma, las características y dimensiones, se debe acudir al apartado de *Frame of Reference* para dar un calado y situación de la perpendicular de proa, popa y la maestra del buque (Ilustración 7).

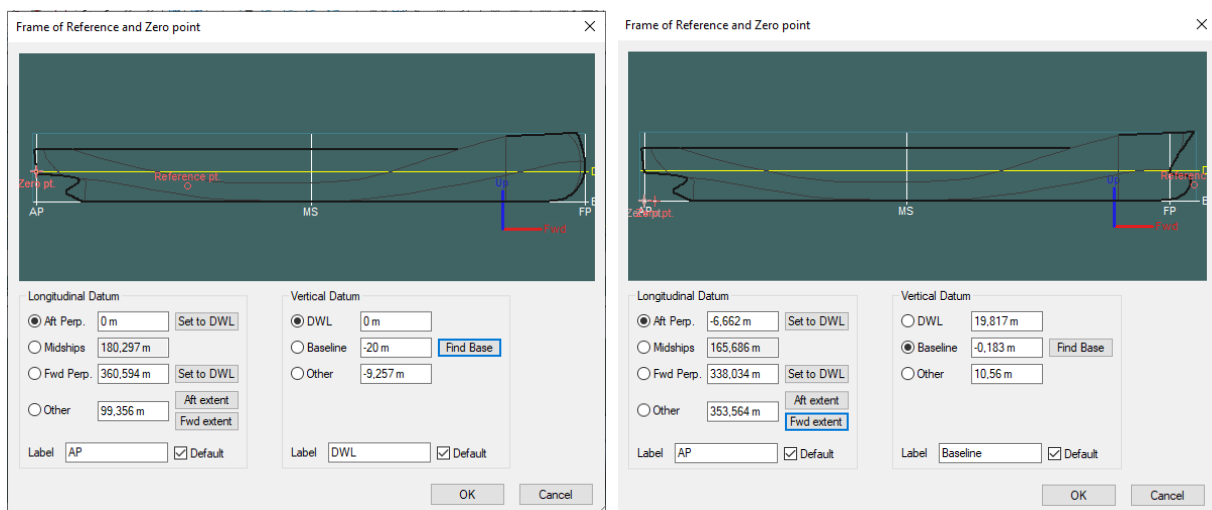


Ilustración 7: Calados para los buques con proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha)

Con los datos introducidos y los diseños de los cascos, el programa es capaz de proporcionar los cálculos hidrostáticos, pudiendo así comparar ambos diseños. Mediante estos resultados obtenidos, podemos ver que desplazamiento (*Displacement*) del buque con proa invertida es superior al del buque con bulbo y por tanto el volumen de agua desplazado (*Volume (displaced)*) por este buque es también mayor. En lo que se refiere al área mojada del buque (*Wetted area*), es muy similar en ambos casos, esto se debe a que a mismo calado el buque tiene formas y cantidad de casco muy similares bajo el agua.

Tabla 1: Cálculos hidrostáticos del buque con proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha).

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	211584	t
2	Volume (displaced)	206423,048	m <sup>3</sup>
3	Draft Amidships	20,000	m
4	Immersed depth	19,999	m
5	WL Length	360,545	m
6	Beam max extents on	52,813	m
7	Wetted Area	23491,322	m <sup>2</sup>
8	Max sect. area	994,530	m <sup>2</sup>
9	Waterpl. Area	14879,738	m <sup>2</sup>
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,576	
11	Block coeff. (Cb)	0,542	
12	Max Sect. area coeff.	0,950	
13	Waterpl. area coeff. (	0,781	
14	LCB length	171,455	from ze
15	LCF length	157,049	from ze
16	LCB %	47,554	from ze
17	LCF %	43,559	from ze
18	KB	11,619	m
19	KG fluid	20,000	m
20	BMT	14,182	m
21	BML	528,886	m
22	GMt corrected	5,801	m
23	GML	520,505	m
24	KMT	25,801	m
25	KML	540,505	m
26	Immersion (TPc)	152,517	tonne/c
27	MTc	3054,531	tonne.m
28	RM at 1deg = GMt.Dis	21421,202	tonne.m
29	Length:Beam ratio	6,827	
30	Beam:Draft ratio	2,641	
31	Length:Vol <sup>0.333</sup> rati	6,101	
32	Precision	Medium	63 stati

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	209650	t
2	Volume (displaced)	204536,721	m <sup>3</sup>
3	Draft Amidships	20,000	m
4	Immersed depth	19,999	m
5	WL Length	344,738	m
6	Beam max extents on	52,813	m
7	Wetted Area	23497,023	m <sup>2</sup>
8	Max sect. area	994,460	m <sup>2</sup>
9	Waterpl. Area	14628,222	m <sup>2</sup>
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,597	
11	Block coeff. (Cb)	0,562	
12	Max Sect. area coeff.	0,950	
13	Waterpl. area coeff. (	0,803	
14	LCB length	170,534	from ze
15	LCF length	154,053	from ze
16	LCB %	49,468	from ze
17	LCF %	44,687	from ze
18	KB	11,577	m
19	KG fluid	0,000	m
20	BMT	14,332	m
21	BML	493,380	m
22	GMt corrected	25,909	m
23	GML	504,957	m
24	KMT	25,909	m
25	KML	504,957	m
26	Immersion (TPc)	149,939	tonne/c
27	MTc	3071,235	tonne.m
28	RM at 1deg = GMt.Dis	94799,763	tonne.m
29	Length:Beam ratio	6,528	
30	Beam:Draft ratio	2,641	
31	Length:Vol <sup>0.333</sup> rati	5,851	
32	Precision	Medium	65 stati

Una vez guardados los diseños con sus correspondientes configuraciones, se analiza su resistencia al avance con el módulo correspondiente.

#### 4.2.2 Maxsurf Resistance

Terminado el módulo anterior, es hora de introducir los diseños con sus correspondientes cálculos hidrostáticos en el *Maxsurf Resistance*. Este módulo proporciona una amplia gama de métodos de cálculo, para estimar la resistencia y requisitos de potencia del casco.

Introduciendo los diseños con los parámetros guardados del *Maxsurf Modeller*, se obtiene un gráfico del área mojada en metros cuadrados de cada diseño.

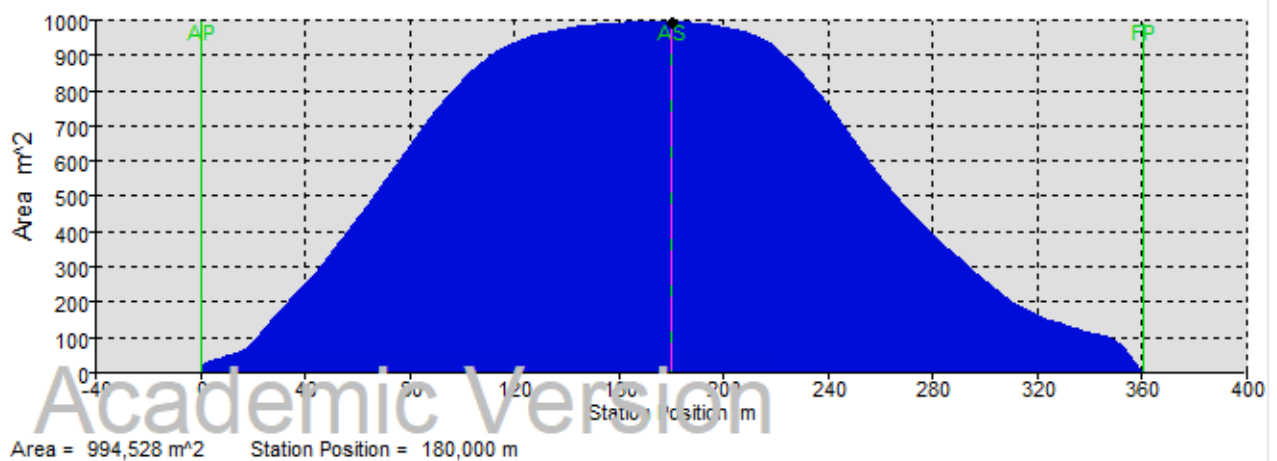


Ilustración 8: Volumen del área mojada del buque con proa invertida

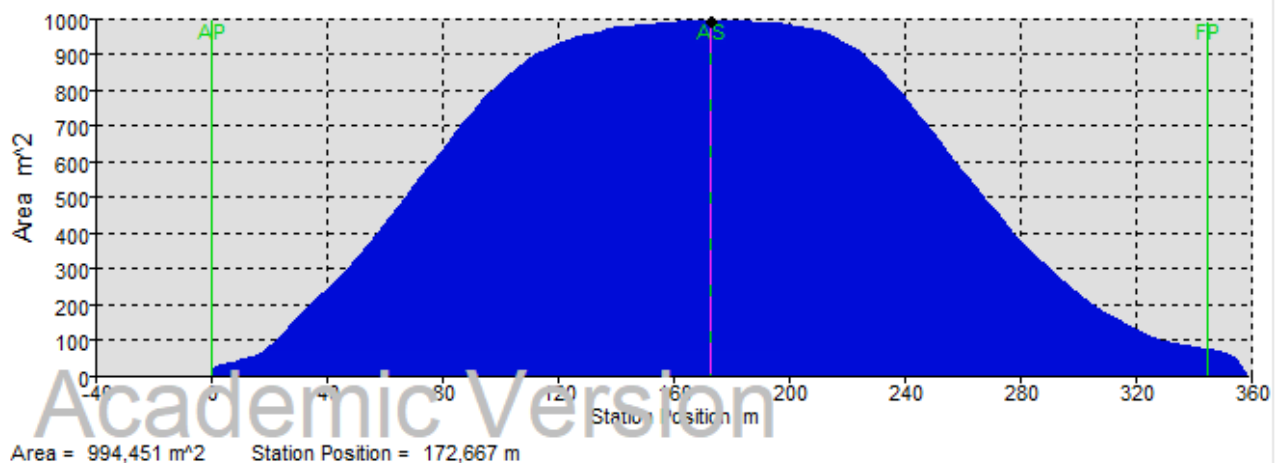


Ilustración 9: Volumen del área mojada del buque con bulbo en la proa

Como se puede observar, el área mojada no varía mucho entre los dos diseños, ya que la única diferencia entre ambos es la proa.

A continuación, se elige el método de cálculo de la resistencia al avance más adecuado para obtener los gráficos de potencia - velocidad, resistencia - velocidad y las tablas con los valores correspondientes.

El *Maxsurf* dispone de distintos métodos de cálculo de la resistencia al avance de acuerdo a barcos de planeo, desplazamiento o yates [18]. En la elección del método de cálculo se acude a la pestaña *Analysis* y dentro del desplegable se seleccionan los métodos más adecuados, en este caso, los correspondientes a métodos de desplazamiento ya que el gasero es un tipo de buque que desplaza gran cantidad de agua en su navegación. De entre los distintos métodos se selecciona finalmente el método de *Holtrop* [19], debido a que los demás métodos nos dan algún tipo de error. Estos errores pueden darse en datos como las dimensiones del buque (eslora y manga), además de en el calado o volumen de agua desplazado. Esto, como ya se ha comentado previamente se debe a que ciertos métodos están pensados para buques con menores dimensiones que el buque que queremos analizar o para buques con menos desplazamiento y calado. Por ejemplo, un barco de planeo tiene un calado muy reducido para evitar al máximo las fuerzas de rozamiento con la superficie del agua y poder moverse a mayor velocidad, un método que está pensado para el análisis de este tipo de buques, no será preciso y dará error en un buque como el que nosotros pretendemos analizar.

Una vez realizada la arriba mencionada selección del método, se obtienen los datos de ambos buques como se puede ver en la tabla 2. Como se puede observar, la mencionada tabla contiene la tabla 1, que proporciona los datos hidrostáticos del buque y, si se analiza, en ambos casos, los datos coinciden con los obtenidos mediante el método *Holtrop*, de esta manera se confirma que el método seleccionado es el correcto.

Tabla 2: Cálculos hidrostáticos mediante el método Holtrop de la proa invertida (Izda) y con bulbo (Dcha)

	Item	Value	Units	Holtrop
1	LWL	360,545	m	360,545
2	Beam	52,813	m	52,813
3	Draft	19,999	m	19,999
4	Displaced volume	206561,157	m <sup>3</sup>	206561,1
5	Wetted area	23302,461	m <sup>2</sup>	23302,46
6	Prismatic coeff. (Cp)	0,576		0,576
7	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,782		0,782
8	1/2 angle of entrance	7,8	deg.	7,8
9	LCG from midships(+ve for'd)	-8,806	m	-8,806
10	Transom area	0	m <sup>2</sup>	0
11	Transom wl beam	0	m	--
12	Transom draft	0	m	--
13	Max sectional area	994,53	m <sup>2</sup>	--
14	Bulb transverse area	0	m <sup>2</sup>	0
15	Bulb height from keel	0	m	0
16	Draft at FP	20	m	20
17	Deadrise at 50% LWL	1,2	deg.	--
18	Hard chine or Round bilge	Round bilge		--
19				
20	Frontal Area	0	m <sup>2</sup>	
21	Headwind	0	kn	
22	Drag Coefficient	0		
23	Air density	0,001	tonne/	
24	Appendage Area	0	m <sup>2</sup>	
25	Nominal App. length	0	m	
26	Appendage Factor	1		
27				
28	Correlation allowance	0,0004		Calculated
29	Kinematic viscosity	0,00000118	m <sup>2</sup> /s	
30	Water Density	1,0259	tonne/	

	Item	Value	Units	Holtrop
1	LWL	344,738	m	344,738
2	Beam	52,813	m	52,813
3	Draft	20	m	20
4	Displaced volume	204666,688	m <sup>3</sup>	204666,6
5	Wetted area	23294,263	m <sup>2</sup>	23294,26
6	Prismatic coeff. (Cp)	0,597		0,597
7	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,804		0,804
8	1/2 angle of entrance	12,2	deg.	12,2
9	LCG from midships(+ve for'd)	-1,831	m	-1,831
10	Transom area	0,008	m <sup>2</sup>	0,008
11	Transom wl beam	22,792	m	--
12	Transom draft	0	m	--
13	Max sectional area	994,524	m <sup>2</sup>	--
14	Bulb transverse area	75,25	m <sup>2</sup>	75,25
15	Bulb height from keel	10,024	m	10,024
16	Draft at FP	20	m	20
17	Deadrise at 50% LWL	1,1	deg.	--
18	Hard chine or Round bilge	Round bilge		--
19				
20	Frontal Area	0	m <sup>2</sup>	
21	Headwind	0	kn	
22	Drag Coefficient	0		
23	Air density	0,001	tonne/	
24	Appendage Area	0	m <sup>2</sup>	
25	Nominal App. length	0	m	
26	Appendage Factor	1		
27				
28	Correlation allowance	0,0004		Calculated
29	Kinematic viscosity	0,00000118	m <sup>2</sup> /s	
30	Water Density	1,0259	tonne/	

Decidido el método que no da ningún tipo de error, es hora de introducir las velocidades entre las que se tiene pensado obtener la información de resistencia y potencia que el casco requiere.

Esta información es dada en la tabla *Results* que se puede ver en la tabla 3.



Tabla 3: Resultados mediante el método Holtrop

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Holtrop Resist. (kN)	Holtrop Power (kW)		Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Holtrop Resist. (kN)	Holtrop Power (kW)
8	8,500	0,074	0,182	436,5	1908,759	8	8,500	0,075	0,182	447,8	1958,212
9	9,000	0,078	0,192	486,3	2251,734	9	9,000	0,080	0,193	499,1	2310,651
10	9,500	0,082	0,203	538,7	2632,775	10	9,500	0,084	0,203	552,9	2702,272
11	10,000	0,087	0,214	593,6	3053,788	11	10,000	0,088	0,214	609,4	3135,036
12	10,500	0,091	0,224	651,0	3516,683	12	10,500	0,093	0,225	668,5	3610,899
13	11,000	0,095	0,235	711,0	4023,381	13	11,000	0,097	0,235	730,1	4131,829
14	11,500	0,099	0,246	773,5	4575,830	14	11,500	0,102	0,246	794,4	4699,818
15	12,000	0,104	0,256	838,4	5176,020	15	12,000	0,106	0,257	861,3	5316,892
16	12,500	0,108	0,267	906,0	5826,007	16	12,500	0,111	0,267	930,7	5985,145
17	13,000	0,112	0,278	976,1	6527,944	17	13,000	0,115	0,278	1002,8	6706,756
18	13,500	0,117	0,288	1048,8	7284,109	18	13,500	0,119	0,289	1077,6	7484,029
19	14,000	0,121	0,299	1124,2	8096,952	19	14,000	0,124	0,300	1155,1	8319,426
20	14,500	0,125	0,310	1202,4	8969,135	20	14,500	0,128	0,310	1235,4	9215,616
21	15,000	0,130	0,320	1283,4	9903,583	21	15,000	0,133	0,321	1318,6	10175,51
22	15,500	0,134	0,331	1367,4	10903,53	22	15,500	0,137	0,332	1404,9	11202,34
23	16,000	0,138	0,342	1454,6	11972,60	23	16,000	0,142	0,342	1494,3	12299,67
24	16,500	0,143	0,353	1545,0	13114,83	24	16,500	0,146	0,353	1587,1	13471,47
25	17,000	0,147	0,363	1639,1	14334,74	25	17,000	0,150	0,364	1683,4	14722,20
26	17,500	0,151	0,374	1737,0	15637,38	26	17,500	0,155	0,374	1783,5	16056,79
27	18,000	0,156	0,385	1838,9	17028,43	27	18,000	0,159	0,385	1887,8	17480,76
28	18,500	0,160	0,395	1945,3	18514,16	28	18,500	0,164	0,396	1996,4	19000,24
29	19,000	0,164	0,406	2056,5	20101,59	29	19,000	0,168	0,407	2109,8	20621,99
30	19,500	0,169	0,417	2173,0	21798,42	30	19,500	0,173	0,417	2228,3	22353,51
31	20,000	0,173	0,427	2295,0	23613,15	31	20,000	0,177	0,428	2352,3	24202,97
32	20,500	0,177	0,438	2423,2	25555,05	32	20,500	0,181	0,439	2482,4	26179,30
33	21,000	0,182	0,449	2557,9	27634,21	33	21,000	0,186	0,449	2618,8	28292,15
34	21,500	0,186	0,459	2699,8	29861,64	34	21,500	0,190	0,460	2762,3	30552,07
35	22,000	0,190	0,470	2849,4	32249,42	35	22,000	0,195	0,471	2913,2	32970,79
36	22,500	0,195	0,481	3007,4	34810,64	36	22,500	0,199	0,481	3072,2	35561,20
37	23,000	0,199	0,491	3174,3	37559,09	37	23,000	0,203	0,492	3240,0	38336,77
38	23,500	0,203	0,502	3350,7	40508,43	38	23,500	0,208	0,503	3417,1	41310,48
39	24,000	0,208	0,513	3537,1	43671,72	39	24,000	0,212	0,514	3603,7	44493,80
40	24,500	0,212	0,523	3733,9	47061,63	40	24,500	0,217	0,524	3800,2	47897,03
41	25,000	0,216	0,534	3941,5	50692,00	41	25,000	0,221	0,535	4006,8	51531,28

Entre ambas tablas se puede comparar la diferencia de resistencia y potencia que hay entre el casco con proa invertida y el casco con bulbo, viendo mediante los datos aportados por el programa, que la diferencia entre ambos cascos es pequeña. Si se analizan los datos obtenidos se observa que a mayor velocidad mayor es la diferencia de un barco a otro en la resistencia que opone al avance. A pesar de que la diferencia entre los cascos sea pequeña, el buque cuya proa es de tipo invertida necesita de menos potencia puesto que opone menos resistencia al avance.

Además de analizando las tablas comentadas arriba, se puede vislumbrar que la diferencia entre ambos buques es mínima acudiendo a las gráficas que relacionan velocidad y potencia, así como a las que relacionan velocidad y resistencia al avance (Ilustraciones 10 y 11). En ambas gráficas la curva generada comienza en 5 nudos, ya que este es el límite inferior que hemos establecido para el análisis, llegando a estudiar qué potencia necesitaría a 25 nudos, que es el límite superior establecido. Ambas gráficas crecen exponencialmente, y a medida que aumenta la velocidad tanto la potencia necesaria como la resistencia al avance el crecimiento es exponencial de grado 6.

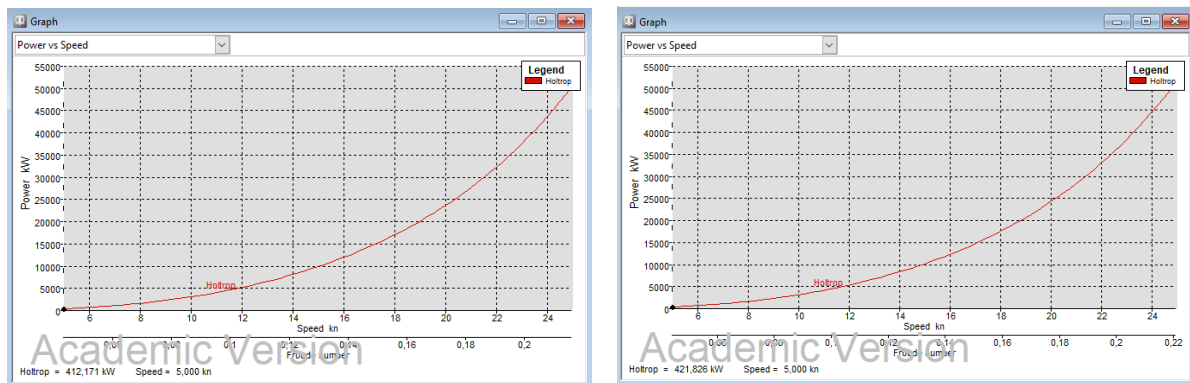


Ilustración 10: Potencia vs Velocidad buque con proa invertida (Izda) con bulbo (Dcha)

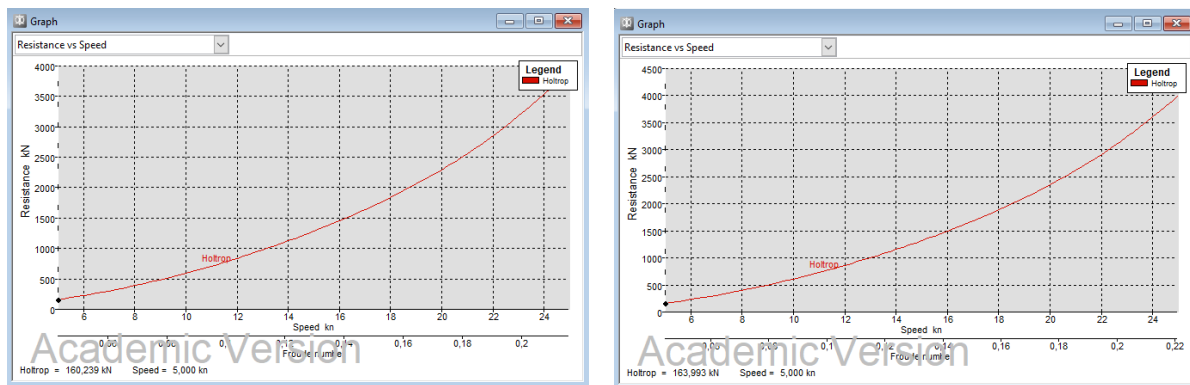


Ilustración 11: Resistencia vs Velocidad buque con proa invertida (Izda) con bulbo (Dcha)

Estableciendo una relación entre los datos obtenidos por la tabla *Results* y los gráficos, se observa que una velocidad adecuada para estos cascos sería de 20 nudos, una velocidad entre las que este tipo de barcos suele navegar, que rondan los 14-20 nudos, por la necesidad de unos  $P_E = 24.000 \text{ KW}$  de potencia. Siendo poco eficiente establecer una velocidad de 25 nudos, al necesitar el doble de potencia.

Por último, dentro de este módulo, se puede obtener la estela que dejan los buques navegando a  $V_s = 20$  nudos. Estudiando el sistema de olas de proa y popa, así como la capa límite, se puede conocer si la velocidad de navegación estudiada es adecuada o por el contrario va a generar un consumo excesivo de combustible. [20] En el caso del buque de proa de tipo invertida (Ilustración 12) y en el caso del buque con bulbo en la proa (Ilustración 13). El sistema de olas de proa de ambos buques presenta un número de olas divergentes y una separación entre olas (longitud de onda) muy semejantes ya que la resistencia al avance y el desplazamiento de agua



son también muy semejantes. La única diferencia se puede apreciar en las turbulencias de la proa que son mayores con bulbo que con proa invertida debido a la que la geometría de la proa invertida es más uniforme.

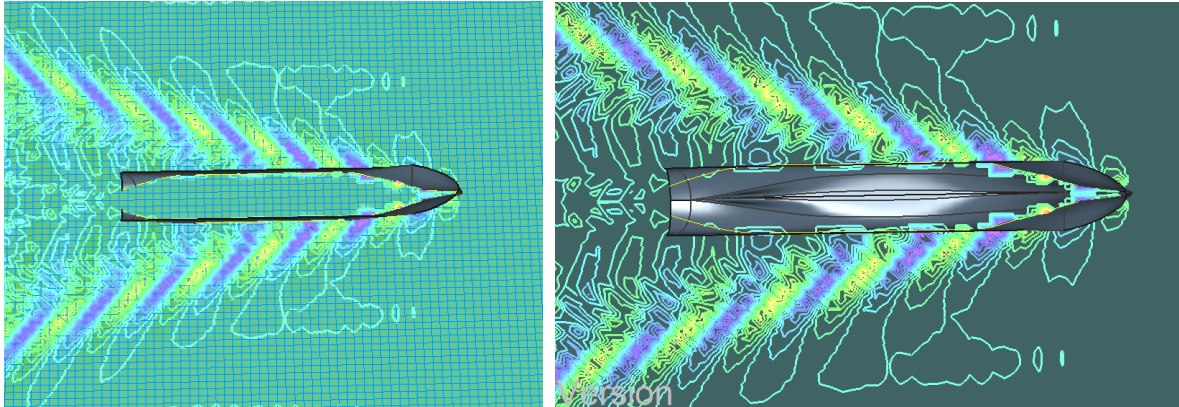


Ilustración 12: Estela del buque con proa invertida

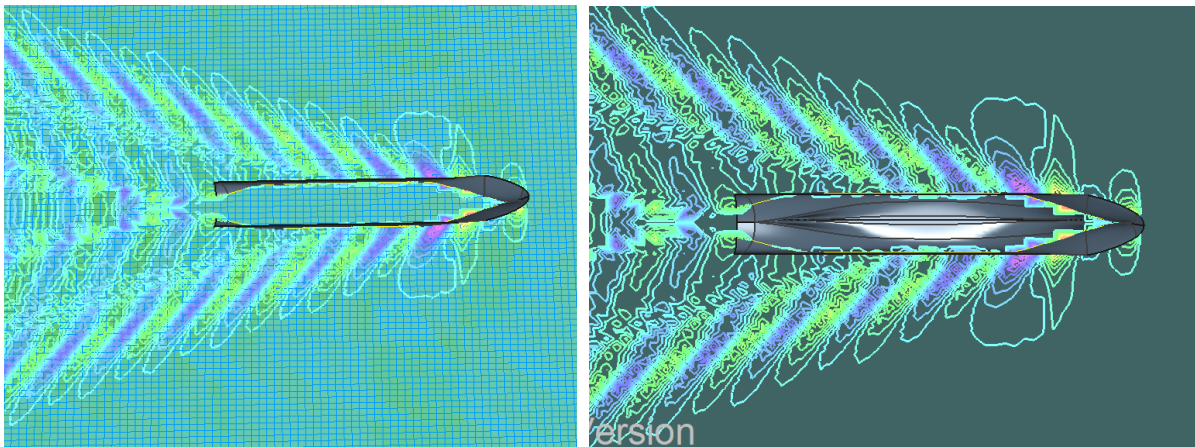


Ilustración 13: Estela del buque con bulbo en la proa

#### 4.2.3 Maxsurf Motions

El módulo *Motions* tiene las herramientas para predecir el rendimiento de los diseños en la mar, usando un entorno gráfico para visualizar los datos, así como, una visualización de los movimientos del buque con distintos tipos de olas.

El primer paso es abrir el diseño en el programa. Una vez se vea en la pantalla principal el casco que se quiere estudiar, se debe acudir a *Analysis* e indicarle en el apartado *Draft* un calado. Por defecto vendrá el calado con el que se guardó el diseño en el *Maxsurf Modeller*.

Si se quisiera cambiar este dato con el fin de estudiar el casco con diferentes calados, podría realizarse sin cambiar los datos iniciales que se introdujeron en el *Maxsurf Modeller*.

Continuando dentro de *Analysis*, toca indicarle, mediante el botón *Measure Hull*, la cantidad de secciones transversales en las que se quiere dividir el barco. En este caso se hará el cálculo con 41 secciones.

Una vez aceptado, por debajo de la línea de agua se crearán el número de secciones transversales marcadas (Ilustración 14).

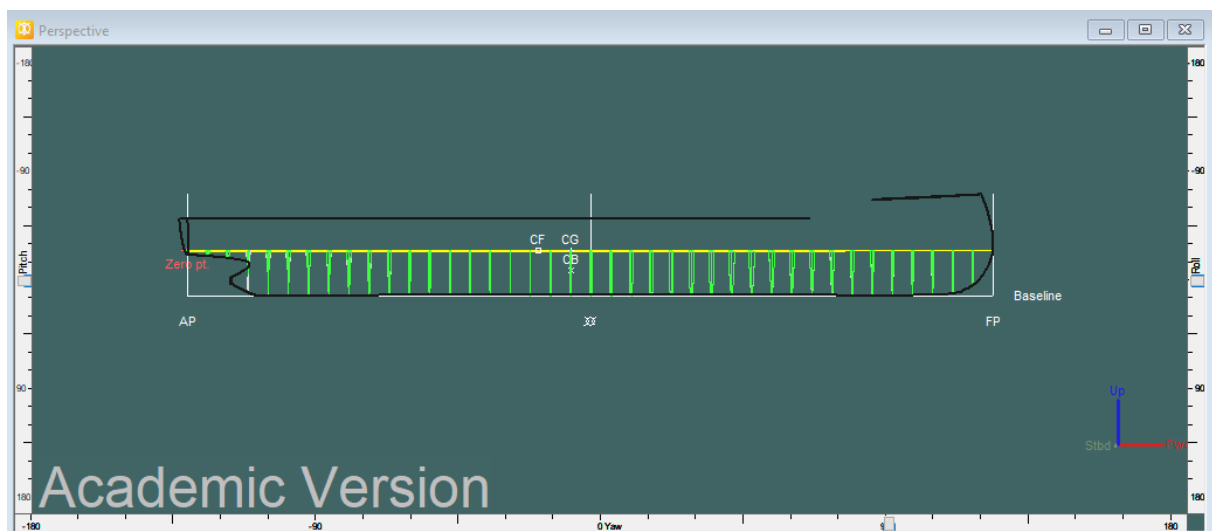


Ilustración 14: Seccionado el buque con proa invertida en 41 cuadernas

Finalizado la elección de las secciones, indicaremos el tipo de casco que es en la ventana de *VesselType*. El programa nos da la posibilidad de elegir entre un catamarán y un monocasco. Por el tipo de buque que es, se escogerá la opción de monocasco.

Cabría también la posibilidad de cambiar el tipo de agua, de agua salada a agua dulce. Por defecto el programa viene en 1,025 toneladas / m<sup>3</sup>, que es el equivalente a agua salada. Para este cambio, dentro del apartado *Analysis* habría que dirigirse a la pestaña *Environment* e introducir la densidad del agua en la que se quiere estudiar el casco.

Una vez finalizado estos pasos, llegaría el momento de introducir en la ventana *Inputs* los datos de localización, velocidad, dirección de partida y el espectro de las olas generadas por el casco.

Para poder introducir los datos, es necesario estar dentro de la ventana *Inputs* e ir marcando cada una de las pestañas que aparecen debajo de la ventana. Estando alguna de las pestañas marcadas, habría que dirigirse a *Edit* y elegir el botón de añadido de cada una. Si la pestaña *Location* esta activada en *Edit* aparecería *Add Remote Location*, si en vez de la pestaña *Location*, estuviese activa la pestaña *Speed* en *Edit* aparecería *Add Speed* y así con las dos restantes.

Se han dejado los valores predefinidos por el programa en *Location*, *Headings* y *Spectra*. Siendo el único valor modificado el de la velocidad, ya que, el valor con el que aparece es 0 y el valor que nos interesa para ver su comportamiento es 20 nudos.

Terminados todos estos pasos, se puede ejecutar el análisis de navegación, el cual se encuentra en el apartado *Analysis*, el botón de *SolveSeakeepingAnalysis*. Pinchando en éste, nos realiza los correspondientes cálculos de *MSI*, *CG RAOs*, *CG Spectra*...apareciendo los resultados en gráficos.

Una vez finalizado el análisis de navegación, el programa permite el cálculo de las superficies de las olas. Aquí, da opción a seleccionar el tipo de ola, esto es, regular o irregular, la frecuencia y la altura de ésta. Una vez establecidos los mencionados parámetros, se activará la simulación mediante el comando *Animate* en el apartado *Display*, el cual mostrará, mediante una animación, las olas fijadas previamente, así como el comportamiento que tiene el buque, pudiendo comprobar visualmente si el buque cabecea mucho o no pudiendo así ver en qué puntos sufrirá más el casco debido a arrufos y quebrantos.

Se han realizado varios ensayos a distintas condiciones de mar con ambos buques.

Ensayo 1:

- 0,601 rad/s
- 4m de ola
- 20m de calado

En este ensayo se ha observado que el buque de proa invertida cuando el mar viene de proa o de amura tiene un comportamiento bastante tranquilo en cuanto a su movimiento de cabeceo, considerándolo ligeramente menor que el movimiento de cabeceo que tiene la proa con bulbo. Cuando el oleaje golpea al buque por costado ambos buques tienen un considerable movimiento de abatimiento y un movimiento de escora casi inexistente a pesar de que debido a las olas el agua estaría al borde de la cubierta principal. Si la marea fuese por la aleta, la navegación sería imposible por la escora de  $90^\circ$  que alcanzaría el buque, un movimiento que produciría la escora del buque.

#### Ensayo 2:

- 0,601 rad/s
- 6m de ola
- 20m de calado

En el siguiente ensayo se ha mantenido la frecuencia de la ola y se ha aumentado su altura, en este caso se ha visto un mayor cabeceo en ambos buques, llegando a salir por completo la proa e introduciéndose casi por completo en el agua.

Cuando el agua golpea por amura al casco, ambos buques tienen un cabeceo considerable, llegando a verse un mejor comportamiento del buque con proa invertida por no salir tanto su proa. En cambio, cuando las olas vienen de costado se observa un considerable abatimiento y una escora notoria, con lo que el agua cubriendo casi por completo la cubierta principal. Pudiéndose observar que el buque con bulbo en la proa y el buque con proa invertida en este caso se comportan igual.

Como en el ensayo 1, si el oleaje golpea al casco por la aleta es imposible su navegación por la escora cogida por el buque.

#### Ensayo 3:

- 0,999 rad/s
- 4m de ola
- 20m de calado

En el siguiente ensayo, al aumentar la frecuencia de las olas, se nota una mejoría en los cascos tanto cuando las olas vienen de proa como por amura, sin un movimiento de cabeceo que se pueda apreciar en ambos buques ni ningún movimiento de escora.

Sin embargo, cuando las olas vienen de costado se aprecia un movimiento de escora en los dos buques y cuando este es de aleta el movimiento de abatimiento y de escora se hace visible, haciendo difícil su navegación.

#### Ensayo 4:

- 0,999 rad/s
- 6m de ola
- 20m de calado

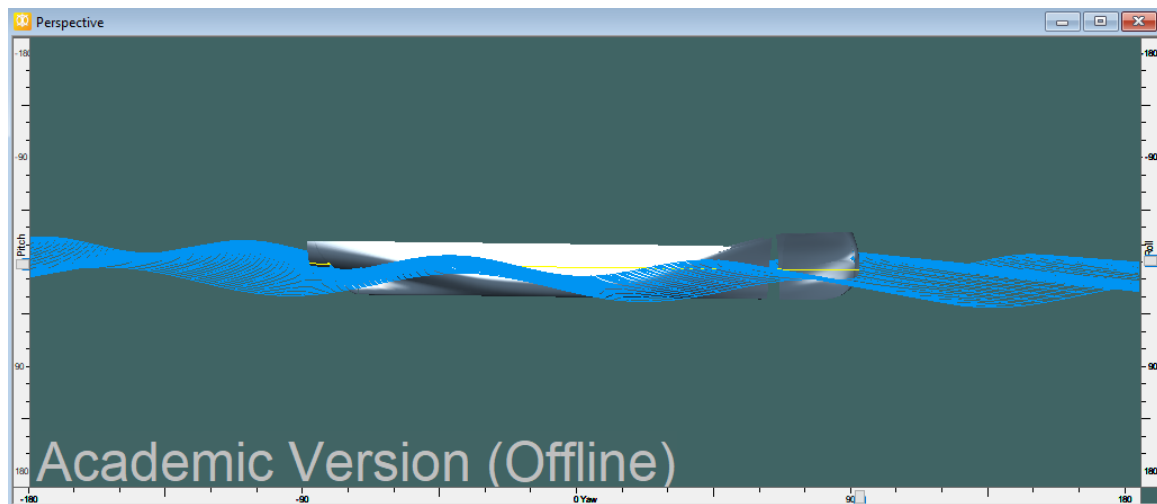
Los resultados obtenidos en este ensayo son muy parecidos al ensayo anterior teniendo en cuenta el incremento de movimientos de abatimiento y de escora por el aumento de la altura de las olas. Cuando las olas golpean por proa, ambos buques no presentan cabeceo.

Por amura, el cabeceo sigue sin existir, pero crece el movimiento de abatimiento, aumentando la posibilidad de entrada de agua por la popa.

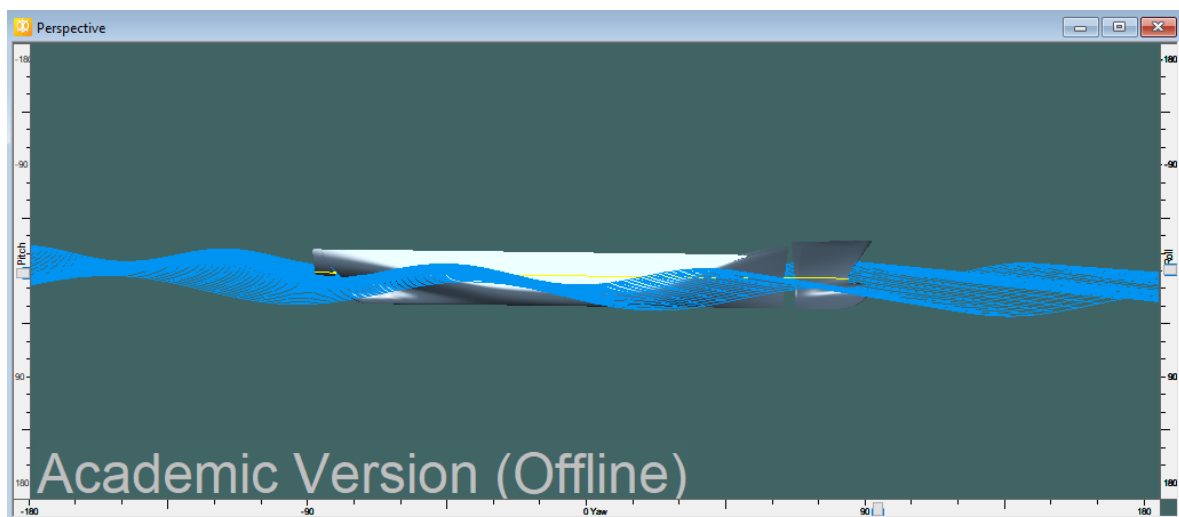
Cuando es de costado el oleaje, no hay posibilidad de inundación, siendo el movimiento de escora ligero y no pudiendo notar una diferencia entre los dos buques.

Si las olas vienen por aleta, como en todos los otros ensayos, la navegación se hace muy difícil por unos movimientos de abatimiento y escora muy pronunciados.

Una vez finalizado los ensayos, se ve una buena navegación en general cuando las olas vienen de proa, notándose mejoría cuando la frecuencia de las olas es mayor en ambos buques, tanto por la función del bulbo como la geometría de la proa invertida.



*Ilustración 15: Animación del ensayo 4 del buque con proa invertida*



*Ilustración 16: Animación del ensayo 4 del buque con bulbo en la proa*

### 4.3 Fabricación mecánica

En el presente apartado se va a llevar a cabo la elaboración del proceso de fabricación de los dos cascos y posteriormente, una vez analizado cuál de los dos cascos sería más viable a la hora de fabricarlo y teniendo en cuenta los datos recopilados por el estudio hidrodinámico, se tomará la decisión de llevar a cabo la fabricación de uno de ellos a escala.

Para poder llevar esto a cabo se necesitará también el diseño y fabricación de los utillajes de amarre.

#### 4.3.1 Herramientas utilizadas

Para la fabricación de modelo a escala se han usado diferentes tipos de herramientas, esto ha sido necesario por el uso de diversas estrategias de mecanizado. Para un ahorro en el tiempo de mecanizado, es preferible el uso de la herramienta idónea. Si no fuese así, podría darse el caso de una gran demora en el proceso de mecanizado, un mal acabado de la pieza o incluso una pieza defectuosa.

Por ello es de gran importancia a la hora de elegir las estrategias elegir correctamente las herramientas que las van a llevar a cabo. Por ejemplo, no es lo mismo a la hora de planear una cara el uso de un plato de planear de Ø63mm que una fresa de Ø16mm, ya que varían en la cantidad de dientes y en su diámetro, con lo que cada una abarcará una superficie plana diferente.

Por el contrario, para un desbaste del material, resulta más eficiente la fresa de Ø16mm que el plato de planear, ya que el plato de planear, por el tamaño de sus placas, puede dar una pasada de mayor o menor profundidad, pero siendo esta menor que la que es capaz de dar una fresa plana al poder abarcar más de su diámetro en altura si no se excede en su profundidad lateral. También habría que sumarle la velocidad de corte y el avance por diente de cada herramienta. Las herramientas utilizadas han sido:

1. Plato para planear de Ø63mm con 5 injertos de placas, la calidad de las placas usadas ha sido la SEET M8330, que, sin ser una calidad específica para este tipo de material, es válida por su geometría de corte
2. Fresa plana (Ilustración 17) específica para aluminio de metal duro integrado (MDI) de Ø16mm para desbaste y acabado, con 3 filos de corte, con destalonado excéntrico y rectificado de pulimento para una mejor evacuación de la viruta.





*Ilustración 17: Fresa plana específica para aluminio de Ø16mm*

3. Fresa esférica (Ilustración 18) específica para aluminio de metal duro integrado (MDI) de Ø8mm para acabado, con 2 filos de corte para mejorar la evacuación de la viruta y recubrimiento DLC.



*Ilustración 18: Fresa esférica específica para aluminio Ø5mm*

4. Fresa esférica específica para aluminio de metal duro integrado (MDI) de Ø5mm para acabado, con 2 filos de corte para mejorar la evacuación de la viruta y recubrimiento DLC.
5. Fresa esférica específica para aluminio de metal duro integrado (MDI) de Ø3mm para acabado, con 2 filos de corte para mejorar la evacuación de la viruta y recubrimiento DLC.



#### 4.3.2 Utensilio de herramienta

Para el amarre de las herramientas se han utilizado:

1. Porta fresas Weldon de Ø16 BT40
2. Porta pinzas ER32 Ø8-7 BT40
3. Porta pinzas ER32 Ø5-4 BT40
4. Porta pinzas ER32 Ø3-2 BT40
5. Eje porta fresas de Ø27 BT40

El eje porta-fresas de Ø27mm se utiliza para amarrar el plato de planear de Ø63mm. Este tipo de porta es muy utilizado para este tipo de herramientas. La única variación que puede haber es el tamaño del eje, esto depende del diámetro del plato.

El porta-fresas Weldon de Ø16mm se ha usado para el amarre de la fresa de Ø16mm específica para aluminio, se tomó la decisión de usar este en vez de una pinza ER32, por todo el desbaste que tenía que efectuar esta herramienta. Este tipo de amarre evita la posibilidad de que la herramienta, por el esfuerzo que sufre, pueda ir deslizándose, ya que se aprieta mediante un tornillo en la ranura que tiene el mango.

Por último, se han usado los porta-pinzas ER32, en este caso como estas herramientas solo iban a hacer el acabado de la pieza y no iban a sufrir mucho esfuerzo se pudo hacer el mecanizado con este tipo de amarre con pinza. En este tipo de amarre, la pinza indica el diámetro de mango que puede apretar.

#### 4.3.3 Utensilio de amarre

Para el amarre de todas las fases de la pieza se ha empleado una mordaza *Arnold Classic* hidráulica de gran apriete, con un tamaño de boca de 160mm con la que se puede generar una fuerza máxima de amarre de  $F = 15\text{KN}$ .

#### 4.3.4 Proceso de fabricación

A continuación, se va a explicar todo el proceso de fabricación realizado, desde la elección del material óptimo para la pieza, hasta la obtención de la misma pasando por todas las fases de

fabricación de la pieza y sus utillajes, las herramientas y las estrategias de mecanizado utilizadas en cada una.

### 1) Elección de material

El material utilizado para este trabajo ha sido un aluminio 5083 H 111 (Tabla 3), debido a sus propiedades de soldabilidad y a su alta resistencia a la corrosión [21]. Por ello, es un material utilizado en aplicaciones marinas.

Sin embargo, la maquinabilidad del material es difícil por su alta resistencia ya que tiene una resistencia mecánica de 323 N/mm<sup>2</sup> y una dureza de 83 HB.

Tabla 4: Certificado de calidad del Aluminio utilizado

#### ALUMINIO 5083 H 111 EN 485

COMPOSICION QUIMICA % CHEMICAL COMPOSITION %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni
Min				0.400	4.000	0.050			
Max	0.400	0.400	0.100	1.000	4.900	0.250	0.250	0.150	0.050
Actual Values	0.212	0.316	0.045	0.769	4.641	0.132	0.115	0.078	0.025

CARACTERISTICAS MECANICAS- MECHANICAL CHARACTERISTICS						
		Rm N/mm <sup>2</sup>	Rp 0.2 N/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Hardness HB	Other Test
Required values	MIN	275	125	15	80	-
	MAX	350			90	
Actual values		323	138	19	83	-

### 2) Proceso de simulación de la fabricación

Una vez diseñado el casco y realizado su estudio hidrodinámico mediante el programa *Maxsurf*, se analizará cuál es el procedimiento de fabricación más adecuado mediante el programa *Fusion 360*.

El primer problema a solventar para la correcta fabricación del casco se trata de cómo conseguir un buen amarre en sus diversas fases de mecanizado. Para ello, se observa la necesidad de útiles de sujeción, así como la creación de nuevas superficies al barco, con el fin de evitar complicaciones para alguna de las fases del mecanizado.

Todo esto se llevará a cabo en el módulo de diseño, en su apartado de superficies. Como se puede apreciar en la ilustración 19, una vez dentro debemos elegir un plano de trabajo, el cual se muestra en un color más oscuro a los otros dos.

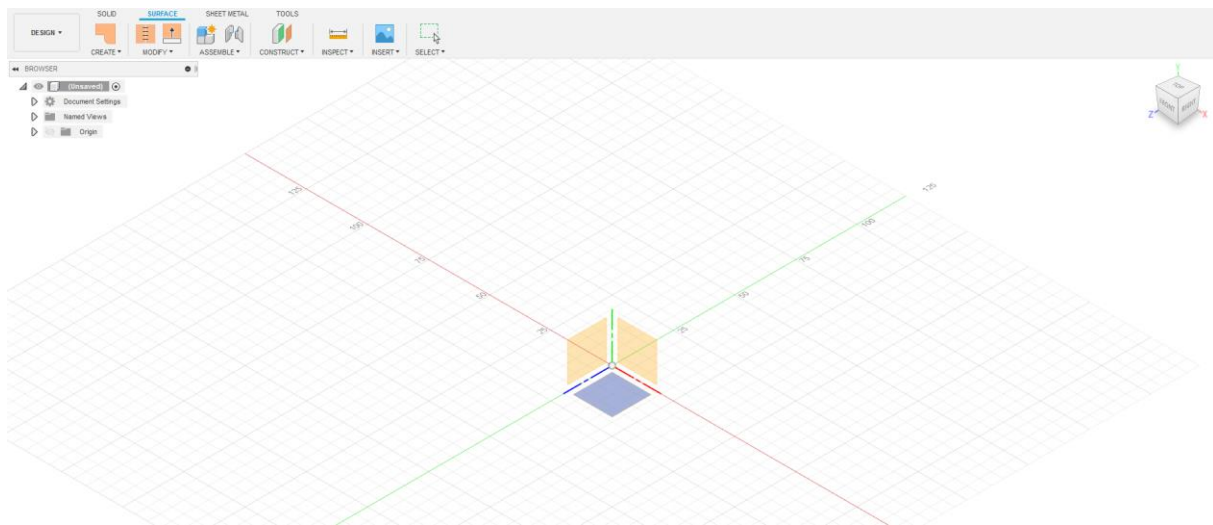


Ilustración 19: Módulo de superficies del software Fusion 360

Para ello, el primer paso es orientar todas las superficies en el mismo sentido, consiguiendo así una coherencia en el diseño, evitando así posibles problemas a la hora de trabajar con el diseño (Ilustración 20).

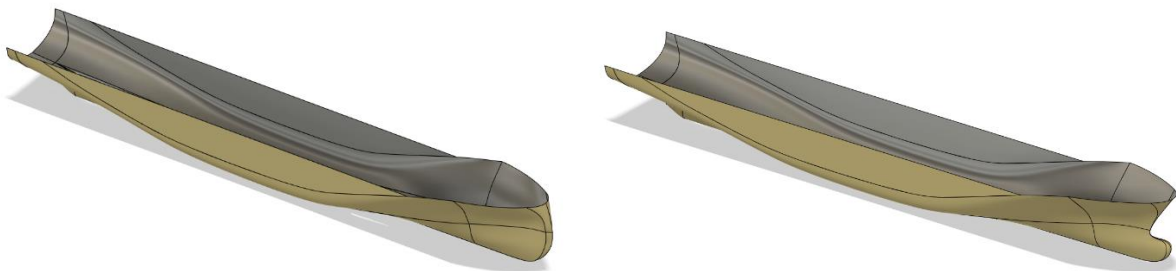


Ilustración 20: Vistas isométricas de los buques proa invertida (Izda) y bulbo en la proa (Dcha) con las superficies orientadas

Teniendo todas las superficies con la misma orientación, se lleva a cabo la creación de las nuevas superficies mencionadas. Para ello, se realiza un cosido de las superficies iniciales del barco, consiguiendo de esta manera la unión de éstas y la formación de un solo cuerpo.

Una vez obtenido éste, se crea un plano a 10 mm de la parte superior del barco (Ilustración 21). En este plano se crea una proyección de las aristas del barco lo más exactas posibles. Con ello se pretende conseguir material para el amarre de la pieza en la 3ª fase del mecanizado. Es una manera sencilla de obtener el resultado deseado, ya que esta nueva prolongación del barco será eliminada en la última fase de la fabricación.

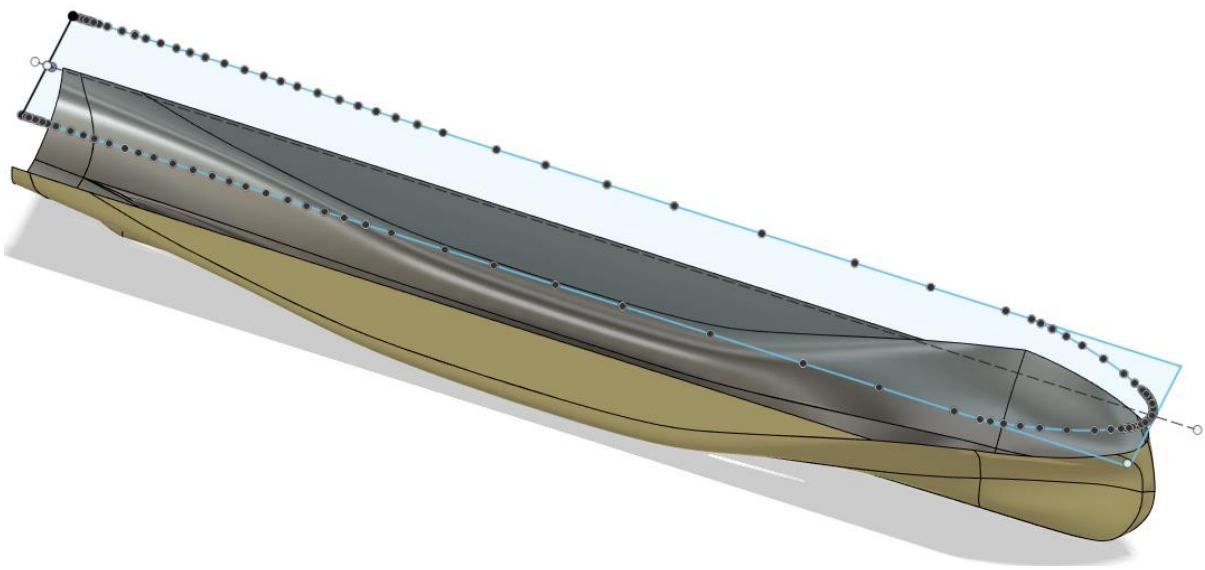


Ilustración 21: Vista del plano generado a 10 mm

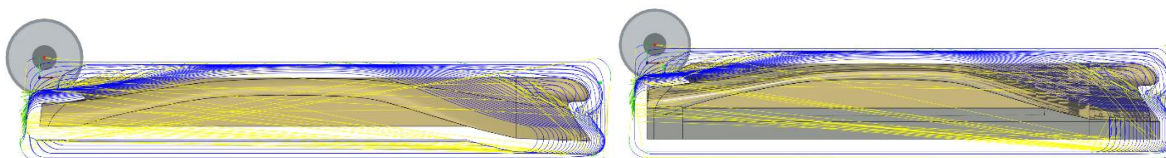
Una vez obtenido la proyección del barco, con el método *Patch* se crea la superficie. A continuación, con el método *Extend* se lleva a cabo la extensión de los vértices hasta que éstos corten con la superficie del barco. Cuando esto ocurre se usa el método *Trim* para cortar los sobrantes, consiguiendo así la nueva forma del barco (Ilustración 22).



*Ilustración 22: Vista lateral de las superficies nuevas generadas*

Hay que tener en cuenta que las nuevas superficies se han creado con la intención de evitar el paso de la herramienta por esa zona, consiguiendo así tener material suficiente para el amarre de la pieza con la mordaza tanto para el buque con proa invertida (Ilustración 24) como para el buque con bulbo en la proa (Ilustración 23). A la izquierda de las dos ilustraciones mencionadas se puede observar la obtención de las superficies para el amarre de la pieza con las trayectorias en azul de la herramienta en su movimiento de corte. Las trayectorias amarillas corresponden a los movimientos de la herramienta para desplazarse por la altura máxima del bruto del material y las trayectorias verdes a los movimientos de aproximación previos al proceso de corte. A la derecha de las ilustraciones 23 y 24, se han generado las superficies necesarias para el amarre del material con la mordaza, observándose la modificación significativa de las trayectorias de corte y posicionamiento de la herramienta en el proceso de mecanizado. Se puede observar que las trayectorias son considerablemente más uniformes lo que facilita el mecanizado de los cascos.

Esto servirá a la hora de mecanizar todo el casco junto, evitando así cualquier tipo de marca entre las dos partes. Este proceso de mecanizado se realizará en la 3ª fase de la pieza.



*Ilustración 23: Simulación de la herramienta sin superficie y con superficie generada respectivamente en la proa con bulbo*

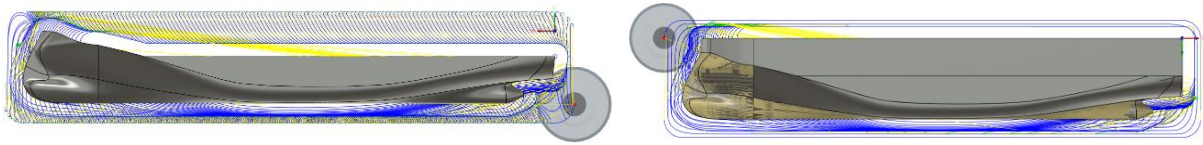


Ilustración 24: Simulación de la herramienta sin superficie y con superficie generada respectivamente en la proa invertida

Terminada esta parte y siendo conscientes del problema que habrá para el amarre, se comenzará con el diseño de los utillajes en el ordenador. En este caso se ve la necesidad de la creación de dos útiles, uno para la 2ª fase del mecanizado y otro para la 4ª fase.

En estos casos, es necesario lograr la forma del casco lo más exacta posible. Por lo que se creará un cuadrado de 50x30x160 mm que simulará la boca de la mordaza. Éste será cortado por la superficie de la pieza con el método *Trim*, obteniendo así la forma exacta del casco en el útil (Ilustración 25)



Ilustración 25: Alzado y perfil del útil para la 2ª fase

Este mismo método se utilizará en el segundo útil, con la única diferencia que se usarían las dos partes del barco para simular las dos bocas de la mordaza.

Finalizada esta parte de diseño, se comienza con el módulo de fabricación, en el cual se deciden; dónde colocar los ejes de coordenadas, las estrategias de mecanizado, las herramientas a utilizar, dónde se sacan las hojas de ruta para el operario de la máquina y lo más importante, el código CNC.

Un dato importante para la colocación de la dirección de los ejes X, Y, Z, es saber la dirección positiva que tienen éstos en la máquina. Se trata de un dato importante ya que a la hora de poner la dirección de los ejes en cada fase tienen que coincidir con la dirección de la máquina. En el caso de la fresadora Hyundai Wia F500 Plus, el sentido de los ejes positivos es como se indica en la ilustración 26

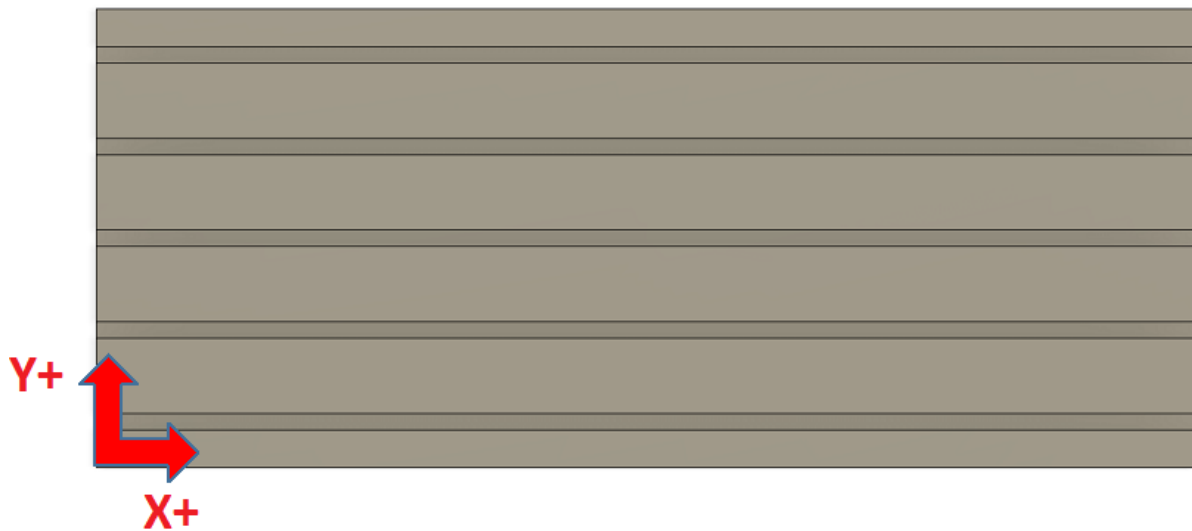


Ilustración 26: Meso del centro Hyundai F500 Plus con la orientación de sus ejes

Como se puede observar en la ilustración 27, éste difiere con respecto al módulo de diseño en las paletas de arriba. En este caso éstas están diseñadas para la fabricación de piezas.

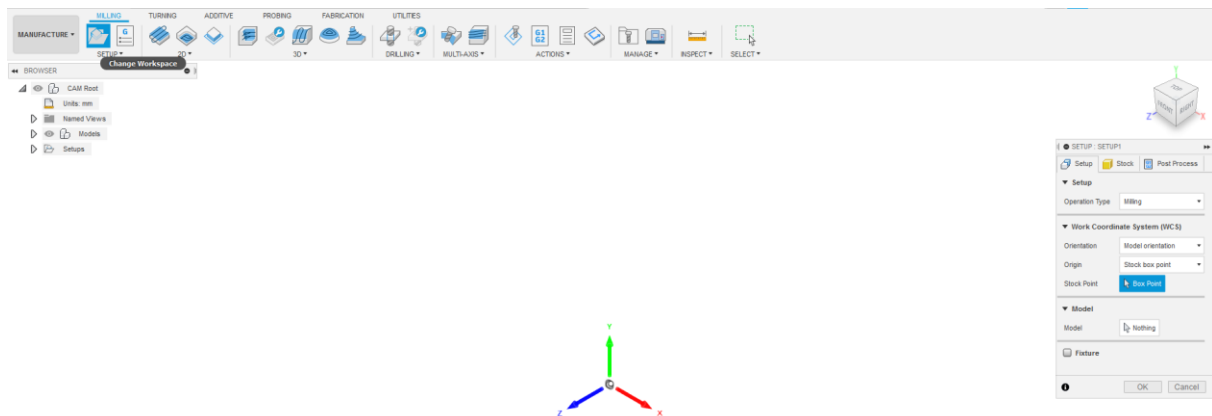


Ilustración 27: Módulo de fabricación del Fusion 360

Para esta 1ª fase, lo primero será elegir la ubicación del eje de coordenadas para la primera puesta de la pieza. Esto se hace mediante el botón *Setup* de la barra superior, una vez



seleccionado el botón, aparece un cuadro en el que se debe situar el eje de coordenadas, la dirección de los vectores X, Y y Z. En este caso, como se puede observar en la ilustración 28, se ha colocado el eje X en el extremo izquierdo del buque, siendo en este caso la popa y el eje Y en su parte superior, correspondiendo a la quilla; por último el eje Z se colocará 0,5 mm por debajo del material. Aquí también se indica al programa cuál es el modelo que se quiere fabricar y el bruto del que se va a partir.

Una vez elegido los parámetros iniciales, comienza la elección de las estrategias de mecanizado con sus correspondientes herramientas, que se explican a continuación

La primera herramienta que se utilizará es un plato de Ø63 mm para planear la superficie y dejarla horizontal a la mesa, quitando así cualquier deformación que pueda traer el material. Después se utilizará una fresa de Ø16 mm específica para aluminio, con la que se utilizará una estrategia de mecanizado *trocoidal* [22], esta estrategia es utilizada para mejorar los tiempos y la vida útil de la herramienta, con lo que se hará la forma del barco dejando una demasía. Por último, se utilizarán 3 fresas esféricas con diferentes diámetros, tales como Ø8, Ø5 y Ø3mm. Los cuales se utilizarán para un semiacabado de la pieza.

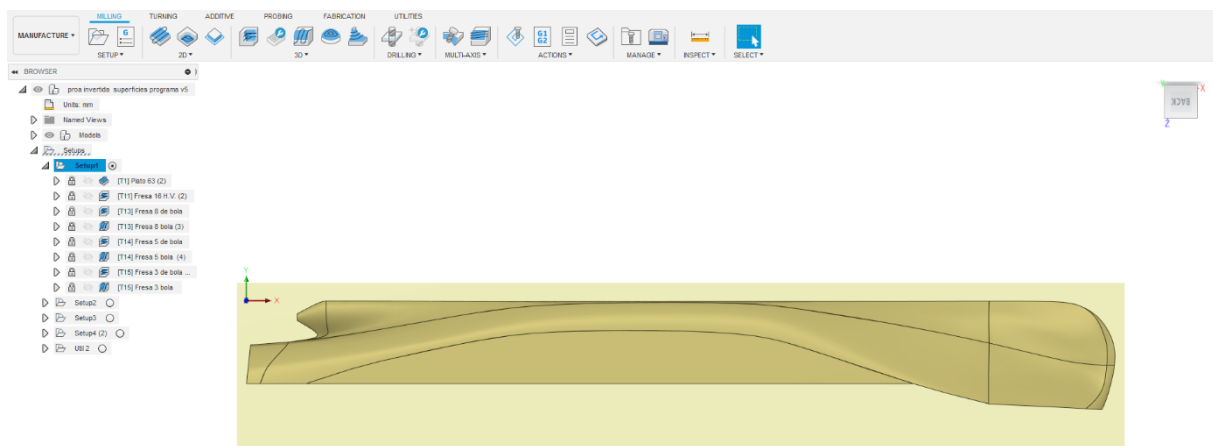


Ilustración 28: Fase 1 del proceso de fabricación

**En la 2ª fase** (Ilustración 29), se girará la pieza 180° en el eje Y colocando el eje de coordenadas en este caso a la derecha de la pieza y hacia abajo. Este cambio de la posición del eje de coordenadas se debe a dos motivos. El primero es, que para la mecanización de esta fase se



necesita la creación de un útil para poder amarrar la pieza con la mordaza. Esto conlleva que si el útil es colocado en la parte móvil podría ocurrir que a la hora de su mecanizado por la holgura que tiene la rosca del usillo, este lado se moviese y pudiese producir la rotura de la herramienta o la mala fabricación de este, produciendo así un mal amarre. Por lo que el útil tiene que ser colocado en la parte fija de la mordaza, evitando así cualquier incidencia. El segundo motivo es, que después de la 1ª fase, la parte de la popa acabará recta, esto facilita mucho el trabajo al operario a la hora de coger “los ceros” de la pieza en vez de si fuese una cara inclinada. A lo que a las herramientas se refiere en este caso, se utilizarán las mismas herramientas, puesto que, las estrategias de mecanizado se repiten al ser ambos lados del casco iguales.

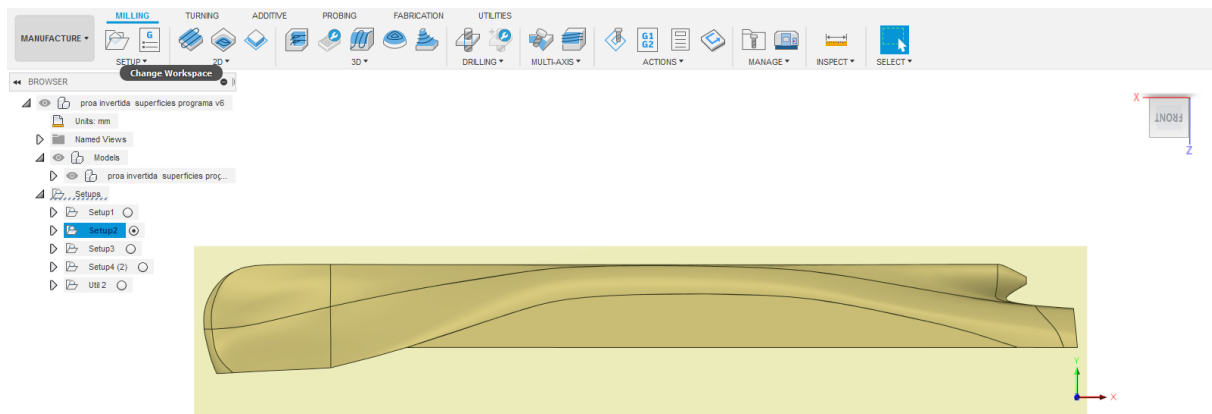


Ilustración 29: Fase 2 del proceso de fabricación

**En la 3ª fase** (Ilustración 30), se rotará en el eje X 90°, dejando el casco del buque hacia arriba. En este caso se vuelve a colocar el eje de coordenadas en una posición muy similar a la fase 1. Se sigue manteniendo la popa como la referencia para la colocación del eje de coordenadas X y la mordaza fija para la colocación del eje de coordenadas Y. Con lo que corresponde al mecanizado solo harán falta dos herramientas de corte, una fresa esférica de Ø5mm y otra fresa plana de Ø12mm. Con la fresa esférica se realizará el acabado del casco con una estrategia de mecanizado en paralelo usando los 3 ejes de la máquina y movimientos a 45°. Con la fresa plana se llevará a cabo el mecanizado de la manga del barco para dejar a medida.

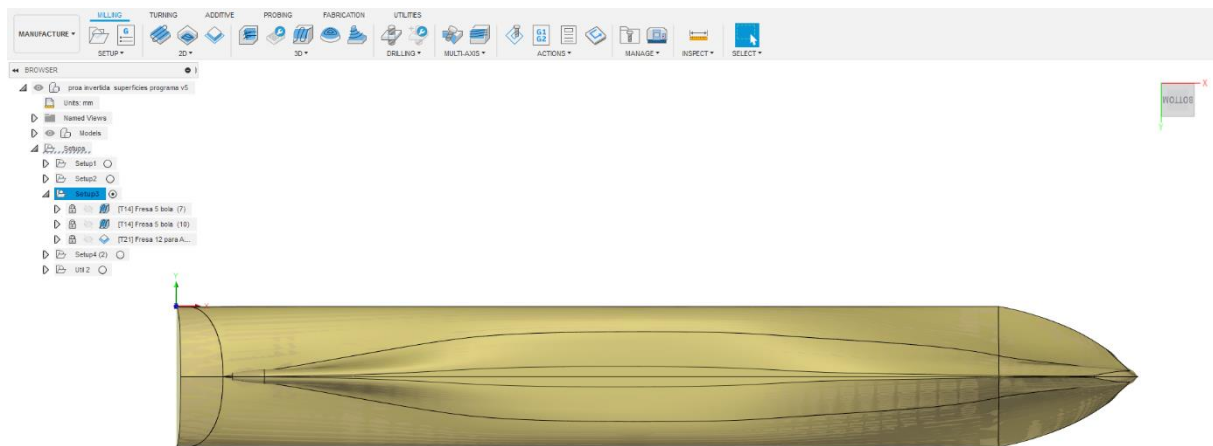


Ilustración 30: Fase 3 del proceso de fabricación

**Para la 4ª fase** (Ilustración 31), se hará una rotación de  $180^\circ$  con respecto al eje X. Para la colocación de “los ceros” de la pieza, se ha optado por seguir usando la popa como referente del eje X por su planitud y el eje Y se ha colocado en el centro del buque. Esto es debido a que al ser la última operación, se tocan los costados del buque y se va al punto medio de la diferencia entre ellos, disminuyendo así el error de la herramienta de medición. A lo que a las herramientas se refiere, la fresa plana de  $\varnothing 12\text{mm}$  y la fresa esférica de  $\varnothing 5\text{mm}$  se repiten y solo se introducirá una herramienta nueva, siendo una fresa plana de  $\varnothing 8\text{mm}$ . En este caso ambas fresas planas utilizarán una estrategia de mecanizado *trocoidal* para desbastar la mayor parte del material.

Siendo la fresa grande la que hace un desbastado general del interior del buque y la pequeña un semi-desbaste del material donde la herramienta de mayor diámetro no entra. Después de estos dos, la fresa de bola hará un acabado interior. Con lo que así quedaría acabado el proceso de fabricación del barco.

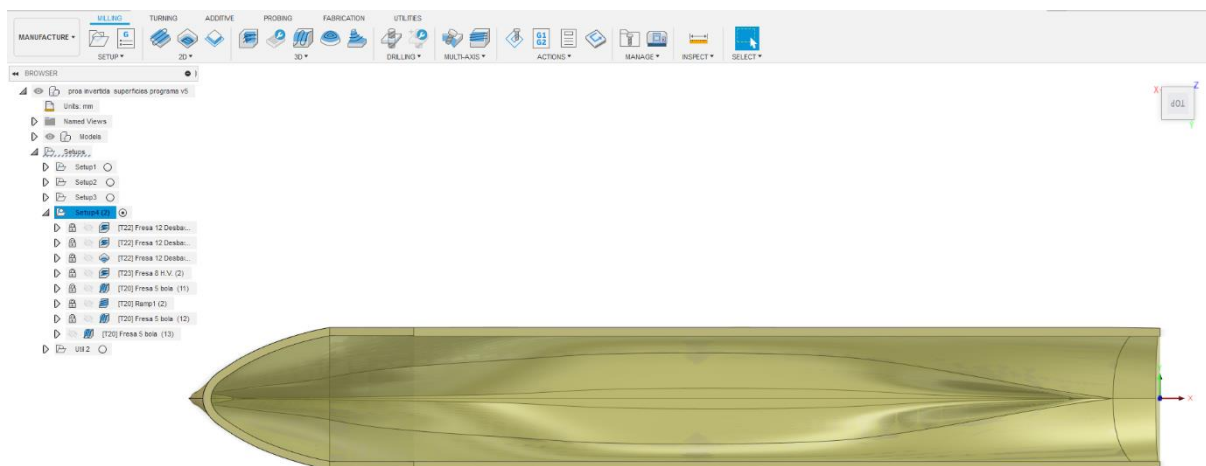


Ilustración 31: Fase 4 del proceso de fabricación

Una vez terminadas las fases del barco, se realizan los mismos pasos para el buque con bulbo, observando mediante la simulación que ofrece el programa (Ilustración 32), que resulta más complicado de mecanizar por las demasías que quedan en la proa con bulbo y que en la proa invertida no se generaban. Esto supone la necesidad de fabricar otro útil y una fase más, siendo un mayor gasto en material, colocación de la pieza y tiempo de mecanizado que el buque con proa invertida no necesita.

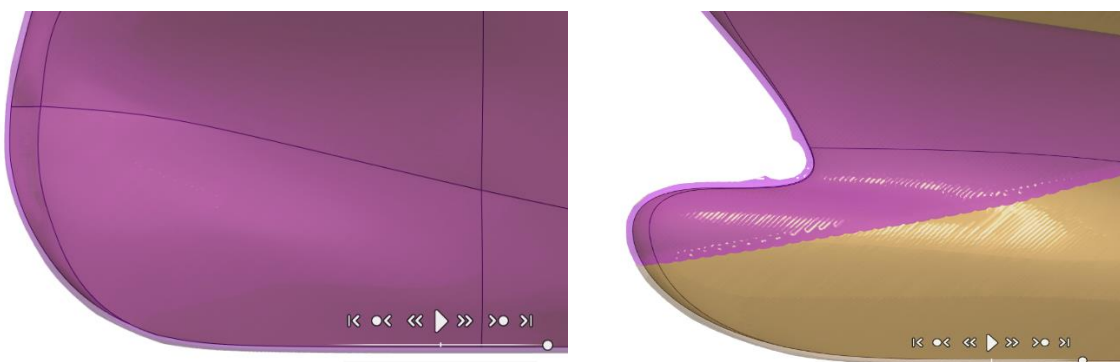


Ilustración 32: Simulación de la proa invertida (Izda) y proa con bulbo (Dcha)

Por ello, se opta por llevar a cabo el proceso de fabricación de los útiles del buque con proa invertida (Ilustración 33). Tanto el útil 1 como el útil 2, se fabricarán en un acero bajo al carbono (*F111*) por su fácil maquinabilidad y bajo coste, por ello las herramientas a utilizar serán específicas para aceros blandos y no para aluminios. Siendo las diferencias con respecto a las

anteriores, la geometría de corte de la herramienta con el filo de la hélice menos afilado para un aumento de la duración de éste, con un ángulo de hélice menor que ronda entre los 30° y 38° y diversos recubrimientos para mejorar el rendimiento de la herramienta. En los dos útiles, las herramientas utilizadas serán las mismas, una fresa plana de Ø16mm y una fresa esférica de Ø5mm.

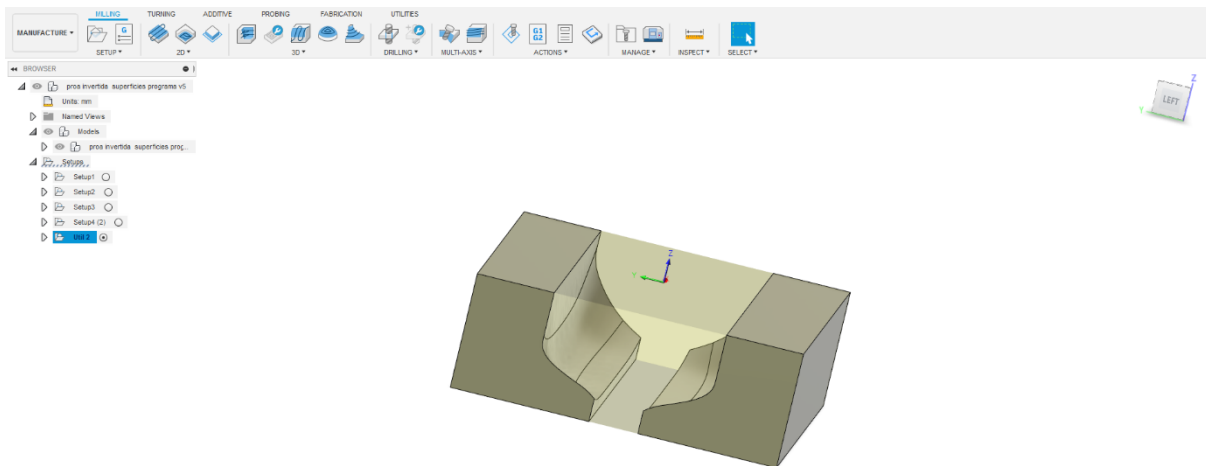


Ilustración 33: Fase útil 2 del proceso de fabricación

### 3) Proceso de mecanizado

Una vez terminado el proceso de simulación de la fabricación mediante el software *Fusion 360* y revisado cualquier tipo de incidencia con las herramientas o la pieza, se dará comienzo al proceso de mecanizado. En este paso se llevará a cabo la fabricación del buque y los utillajes de amarre.

En el proceso de mecanizado se comenzará por la 1ª fase, en la que se ha desbastado gran parte del material dejando la mitad de la forma del barco con una demasía de 0,5mm en toda la pieza (Ilustración 34) para después mediante una fase que se explicará a fondo más adelante cómo ultimar el acabado de la pieza.



*Ilustración 34: Fase 1 del proceso de mecanizado*

Para realizar la otra mitad, se ha necesitado hacer el primer útil, éste ha consistido en mecanizar una pletina de acero bajo en carbono (*F111*), en la que se ha mecanizado la forma del casco para conseguir un mejor amarre de la pieza (Ilustración 35).



*Ilustración 35: Fase útil 1 del proceso de mecanizado*

En la segunda fase, se ha utilizado el útil mencionado anteriormente, así como el desbaste del material, terminando la forma del barco por ambos lados y dejando una demasía de 0,5 mm en el casco para su acabado (Ilustración 36).



*Ilustración 36: Fase 2 del proceso de mecanizado*

En la tercera fase, se ha realizado el acabado de las dos partes del casco juntas, para un buen solapamiento de la unión (Ilustración 37).





*Ilustración 37: Fase 3 del proceso de mecanizado*

A continuación, se ha proseguido con la fabricación del último útil, que ha consistido en mecanizar la forma del casco en dos pletinas de acero bajo en carbono (*F111*), para lograr un buen amarre en la mordaza (Ilustración 38) y poder desbastar la parte interior del barco.



*Ilustración 38: Fase útil 2 del proceso de mecanizado y como quedaría la pieza sujeta*

Por último, una vez fabricado el útil, se ha procedido al desbaste y acabado del interior del barco para obtener un espesor aproximado de 3mm en los costados del buque. En la ilustración 39, se puede observar la parte exterior y en la ilustración 40 la parte interior el modelo final fabricado.



*Ilustración 39: Buque finalizado parte lateral*



*Ilustración 40: Buque finalizado parte interior*



## 5. Conclusiones

Una vez concluido el trabajo y analizados los resultados obtenidos, se extraen las siguientes conclusiones, divididas de acuerdo al trabajo realizado con el programa *Maxsurf* y a la fase de fabricación mediante mecanizado por arranque de viruta:

El programa *Maxsurf*, ha permitido realizar el estudio hidrodinámico de un buque gasero con dos tipos de proa: con bulbo y la modificada convirtiéndola en una de tipo invertida. Esta última proa presenta las siguientes ventajas:

- Los estudios con *MaxsurfMotions* a distintas condiciones de oleaje, confirman una mejora en la navegabilidad del buque y por tanto en la comodidad de los tripulantes. Esto conlleva también una disminución del tiempo del trayecto en condiciones de mala mar
- La resistencia al avance calculada con *MaxsurfResistance* es también menor lo que conlleva que el buque necesite menor potencia de propulsión y menor gasto de combustible.
- Al disminuir el consumo de combustible también se puede concluir que el buque es menos contaminante.

En cuanto a las conclusiones que se obtienen del proceso de mecanizado con 3 ejes del buque a escala con dos proas distintas, son las siguientes:

- La utilización del software para la simulación es de gran ayuda por la posibilidad de visualización del proceso que ofrece, con lo que se pueden detectar las complicaciones que puede haber en el proceso de mecanizado como incidencias con las herramientas y por tanto solventarlas antes de llevar a cabo el proceso. Ahorrando así tiempo y dinero.
- El mecanizado de un buque con bulbo es más complejo de llevar a cabo que el de un buque con proa invertida, por un mayor número de zonas de difícil acceso para la herramienta. Esto llevaría un mayor número de fases de mecanizado para la pieza, así como un mayor número de utillajes.
- Además, el tiempo de mecanizado del buque con bulbo es mayor ya que implica más paradas de máquina para cambiar la posición de la pieza.
- El coste total de operario, utillajes y gasto energético es superior en el mecanizado del buque con bulbo.

Por otra parte, como conclusión final del proceso de mecanizado y para tener en cuenta en líneas futuras de trabajo, se puede decir que un incremento en el número de ejes del centro haría más sencilla la tarea del propio mecanizado ya que se evitaría la fabricación de utillajes y se reducirían los tiempos de mecanizado al evitar paradas para cambios de posición de la pieza.

## 6. Referencias

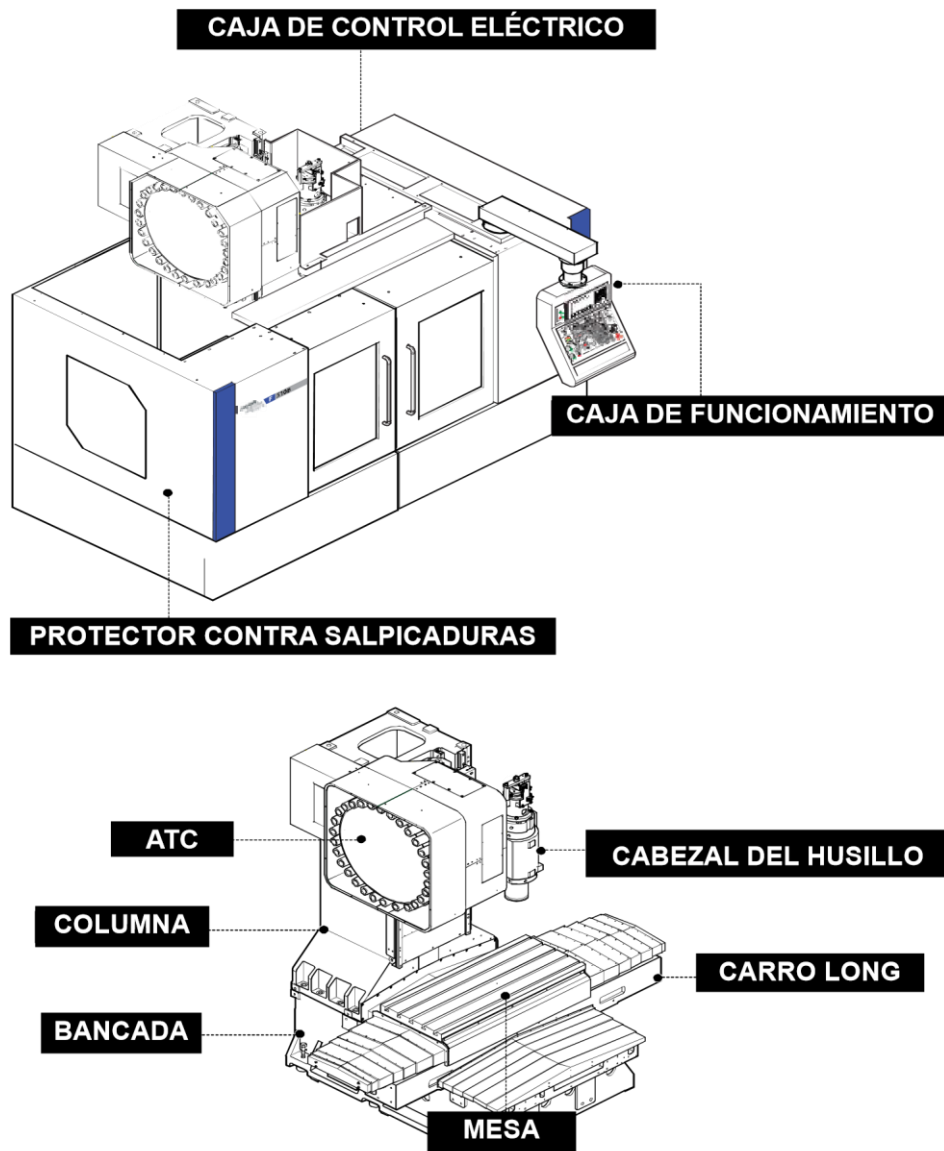
- [1] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- [2] <https://www.bentley.com/es/products/product-line/offshore-structural-analysis-software/maxsurf>
- [3] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [4] <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>
- [5] <https://www.solidworks.com/es>
- [6] <https://int.tebis.com/es/es/>
- [7] <http://www.marine.sener.es/foran>
- [8] <http://cintrana-val-defcar.com/Home/tabid/336/language/en-US/Default.aspx>
- [9] <https://es.slideshare.net/adiezfernandez/canales-hidrodinamicos-20275165>
- [10] <http://canal.etsin.upm.es/instalaciones/>
- [11] <https://www.marin.nl/facilities-and-tools#basins>
- [12] <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion-1/conformacion-por-mecanizado/mecanizado-por-arranque-de-viruta>
- [13] <https://grumeber.com/mecanizado-arranque-viruta/>
- [14] [https://machine.hyundai-wia.com/eu/product/product\\_detail.asp?PRODUCT\\_SEQ=849&PRODUCT\\_CODE=B02001](https://machine.hyundai-wia.com/eu/product/product_detail.asp?PRODUCT_SEQ=849&PRODUCT_CODE=B02001)
- [15] [https://www.fanuc.eu/es/ue\\_zuk/cnc/controles](https://www.fanuc.eu/es/ue_zuk/cnc/controles)
- [16] <https://www.rhino3d.com/la/nurbs>
- [17] <https://nauticajonkepa.wordpress.com/2010/04/17/proas-invertidas/>
- [18] L. Birk. "Fundamentals of Ship Hydrodynamics: Fluid Mechanics, Ship Resistance and Propulsion" Ed. John Wiley & Sons, Ltd. (2019)
- [19] J. Holtrop, GGJ. Mennen. "A statistical power prediction method". International Shipbuilding Progress. Vol. 25 Nº 290 (1978).
- [20] A. Baquero. "Resistencia al Avance del Buque". Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid (2013)
- [21] <https://www.signaluminio.com/placa-aluminio/laminado-en-caliente/5083-Aleacion-de-chapa-de-aluminio-5083.html>
- [22] <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>

## Anexo

### Anexo 1 Especificaciones técnicas de la máquina

Este capítulo explica las características principales, el aspecto, los nombres de las unidades y las especificaciones de la máquina que los usuarios deben conocer para poder ponerla en funcionamiento. Los usuarios podrán hacer funcionar fácilmente la máquina una vez que hayan entendido completamente este capítulo.

#### Anexo 1.1 Disposición de la máquina



**Figura 1.1. Disposición de la máquina**

## Anexo 1.2 Especificación de la máquina

**Tabla 1.2 Especificación de la máquina**

ELEMENTO		unidad	F500	F500/50	F500PLUS
MESA	Tamaño de la mesa	mm (pulg.)	1200×500 (47.2"×19.7")	1200 X 500	1200 X 500
	Capacidad máxima de carga	kg. (lbs)	800 (1764)	800	800
HUSILLO	Conicidad del husillo	-	NT #40 [BBT40]	-	NT #40 [BBT40]
	Husillo, RPM	r/min	8000 [10000]	-	8000 [10000]
	Potencia de salida del husillo (Máx./ Cont.)	kW (HP)	15/11 [18.5/15] (20/15 [25/20])	-	15/11 [18.5/15]
	Par del husillo (Máx./ Cont.)	N·m	286/143 [118/96]	NT #40 [BBT40]	286/143 [118/96]
	Método de accionamiento del husillo	-	CORREA	8000 [10000]	CORREA
AVANCE	Recorrido (X/Y/Z)	mm (pulg.)	1060/510/635 (31.5"/18.1"/20.5")	15/11 [18.5/15]	1060/510/635
	Distancia de superficie de la mesa a husillo	mm (pulg.)	150~785 (5.9"~30.9")	286/143 [118/96]	150 ~ 785
	Distancia de columna a husillo (centro)	mm (pulg.)	615 (24.2")	CORREA	615
	Régimen de avance rápido (X/Y/Z)	m/min	36/36/30	1060/510/635	36/36/30
	Velocidad de avance en corte (X/Y/Z)	m/min	15	150 ~ 785	15
	Tipo de guía	-	GUÍA LM	615	Guías con rodillos
ATC (Cambia dor automáti co de herramie ntas)	Número de herramientas	unidades	24 [30]	36/36/30	30
	Vástago de la herramienta	-	BT40	15	BT40
	Diámetro de mecanizado máximo (W.T / W.O)	mm (pulg.)	Ø90/Ø150 (3.5"/5.9")	Guías con rodillos	Ø90/Ø150
	Máx. longitud de torneado	mm (pulg.)	300 (11.8")	30	300
	Máx. Peso de la herramienta	kg. (lbs)	8 (17.6)	BT40	8
	Método de selección de la herramienta	-	ALEATORIO	Ø90/Ø150	ALEATORIO
	Tiempo de cambio de las herramientas (Hidráulica)	T-T	s	300	NT #40 [BBT40]
		C-C	s	8	8000 [10000]
	Tiempo de cambio de las herramientas (Pneumatic)	T-T	s	ALEATORIO	15/11 [18.5/15]
		C-C	s		286/143 [118/96]

ELEMENTO		unidad	F500	F500/50	F500PLUS
TANQUE CAPACIDAD	Depósito del refrigerante	L (gel)	350 (92.5)		
	Depósito de lubricante	L (gel)	4 (1.1)		1200 X 500
	DEPÓSITO HIDRÁULICO	L (gel)		800 (1764)	800
POTENCIA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	Consumo de aire (0,5MPa)	ℓ/min (gel/min)	110 (29.1)	110 (29.1)	
	Fuente de alimentación eléctrica	(kVA)	25	25	
	Sección del cable de alimentación	mm <sup>2</sup>	MÁS DE 25	MÁS DE 25	
	Tensión	V/Hz	220/60 (200/50)	220/60 (200/50)	
MÁQUINA	Espacio en el suelo (largo x ancho)	mm (pulg.)	2800×2670 (110.2"×105.1")	2800×2670 (110.2"×105.1")	
	Altura	mm (pulg.)	3096 (121.9")	3096 (121.9")	
	Peso	kg. (lbs)	7700 (16976)	7700 (16976)	
NC	Controlador		[HYUNDAI WIA FANUC Serie i]	[HYUNDAI WIA FANUC Serie i]	

**Tabla 1.2 Especificación de la máquina**

☒ Las especificaciones están sujetas a cambios para mejorar sin aviso previo.

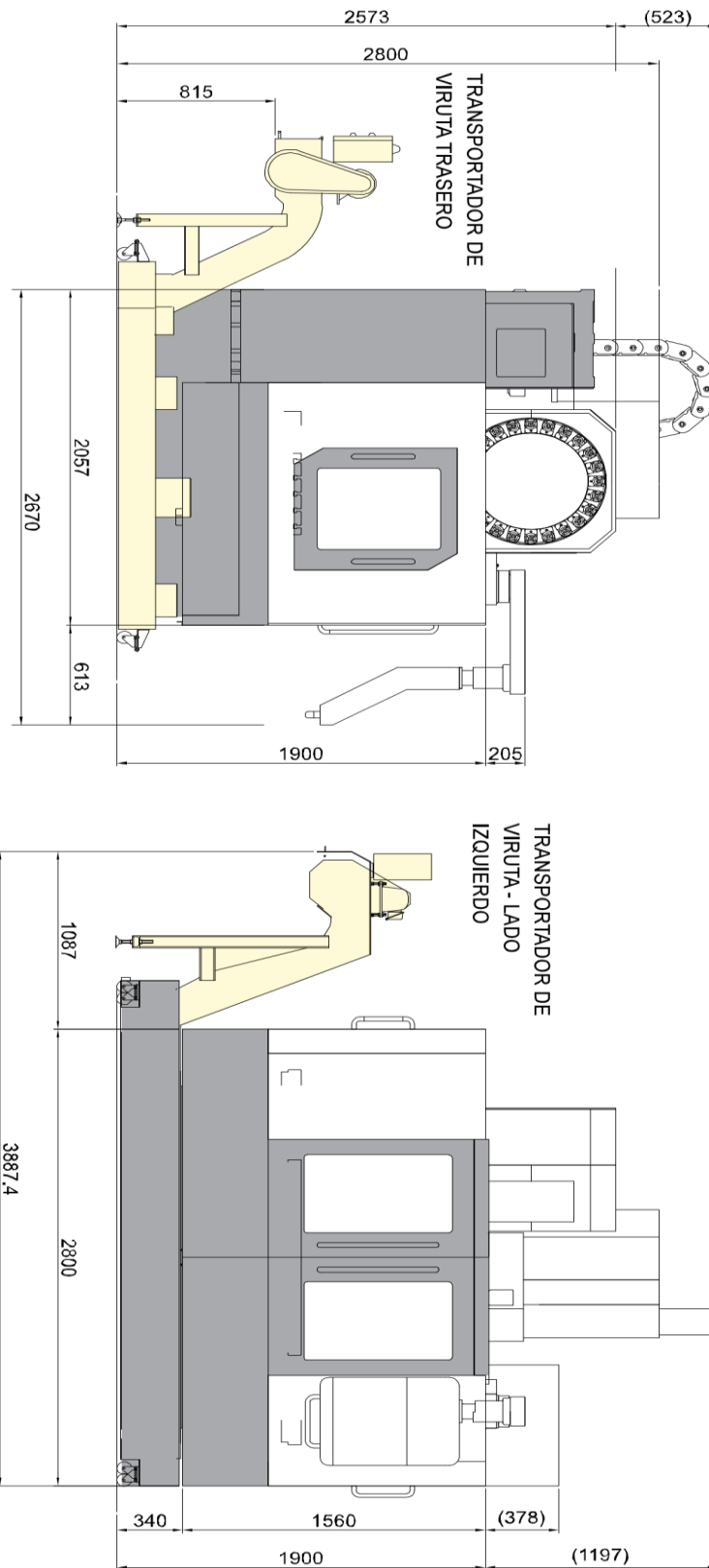
### Anexo 1.3 Accesorios estándar y opcionales

● : Estándar ○: Opción ☆ : Previa consulta X: No aplicable -: Imposible

**Tabla 1.3 Accesorios estándar y opcionales**

Elemento	Comentario	F500	F500/50	F650	F650/50	F500PLUS
Husillo						
8.000rpm (15/22kW)	CORREA	●	X	●	X	○
6.000rpm (15/22kW)	CORREA	X	●	X	●	
10.000rpm (18,5/22kW)	CORREA	○	X	○	X	●
Sistema de refrigeración del husillo	Std.rpm	○	○	○	○	○
	10,000rpm	●	—	●	—	●
ATC (Cambiador automático de herramientas)						
Extensión ATC	24	●	●	●	●	X
	30	○	X	○	X	●
Tipo de vástago de la herramienta	BT40	●	—	●	—	●
	BT50	—	●	—	●	
Cabezal U-Center	D'Andrea	☆	☆	☆	☆	☆
Cambio de Pinza de sujeción de espárrago	45°	●	●	●	●	●
	60°	X	X	X	X	X
	90°	X	X	X	X	X
Mesa y columna						
APC		X	X	X	X	X
Pallet con anclajes roscados		X	X	X	X	X
Palet de ranura en T		●	●	●	●	●
Mesa rotativa de CN		☆	☆	☆	☆	☆
Columna alta	50 HZ	○	○	○	○	○
Sistema de refrigeración						
Est. Refrigerante (Boquilla)		●	●	●	●	●
Refrigerante de descarga de la bancada		●	●	●	●	●
Refrigerante interior del husillo	20bar	○	○	○	○	○
	30bar	○	○	○	○	○
	70bar, 15litros	○	○	○	○	○
	70bar, 30litros	☆	☆	☆	☆	☆
CUBIERTA SUPERIOR (Solamente para refrigerante interior del husillo)		●	●	●	●	●
Boquilla para refrigerante		○	○	○	○	○
Refrigeración por pistola		○	○	○	○	

## Anexo 1.4 Dimensiones externas





**Figura 1.4. Dimensiones externas (unidad: mm.) mm**

## **Anexo 2 Especificaciones de seguridad**

### Aspectos generales de la seguridad

#### 1. Ropas de trabajo

- (1) Las ropas de trabajo, que son ligeras y bien ajustadas, se seleccionarán y si es necesario, las faldas o parte trasera de los pantalones se atarán para evitar que se enreden en las piezas de la máquina.
- (2) Se deberá coser cualquier costura que esté descosida.

#### 2. Casco de trabajo

- (1) Cuando trabaje cerca de la máquina deberá llevar puesto un casco.
- (2) Para mujeres o personas que lleven el pelo largo, deberán cubrirse el pelo completamente con un casco o toalla.

#### 3. Zapatos: Se recomienda llevar calzado de seguridad.

#### 4. Conjuntos de seguridad

- (1) Se seleccionarán conjuntos apropiados para el trabajo y se familiarizarán con su utilización.
- (2) Se deberá llevar cualquier conjunto que resulte necesario. Gafas de seguridad, casco de seguridad)