

SISTEMA HIDRÁULICO MECÁNICO PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA APROVECHANDO LA ENERGÍA DEL OLEAJE



Trabajo Fin de Grado

ALUMNO: RAFAEL ENRIQUE VEGA REGUERO

TUTOR: FRANCISCO VÍLCHEZ CUESTA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
UNIVERSIDAD DE GRANADA

SISTEMA HIDRÁULICO MECÁNICO PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA APROVECHANDO LA ENERGÍA DEL
OLEAJE

Trabajo Fin de Grado

ALUMNO: RAFAEL ENRIQUE VEGA REGUERO

TUTOR: FRANCISCO VÍLCHEZ CUESTA

JUNIO 2014

Imagen de la portada tomada de
http://www.elconfidencial.com/fotos/album/s_n02_00202929201305205546_grande.jpg

ÍNDICE

CAPITULO I

PROBLEMÁTICA	4
MOTIVACIÓN	4

CAPITULO II

ESTUDIO PREVIO	6
GLOSARIO	6
DISEÑOS EXISTENTES	7
TIPOS DE ESTRUCTURAS MARINAS	23

CAPITULO III

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	30
METODO PARA FIJAR LOCALIZACIÓN	30
CÁLCULO PUNTOS WANA	35
ELECCIÓN PUNTO MÁS RENTABLE	44

CAPITULO IV

ELABORACION DE DISEÑOS	45
HIPÓTESIS PREVIAS	45
BASES DE CÁLCULO	46

TIPOS DE DISEÑOS	47
CÁLCULO HIDRÁULICO DE DISEÑO DEFINITIVO	123
CAPITULO V	
CÁLCULO ESTRUCTURAL	125
CÁLCULO DE SOLICITACIONES	125
TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	129
ELECCIÓN DE MATERIAL	133
CAPITULO VI	
VALORACIÓN ECONÓMICA	134
COSTE ESTRUCTURA	134
COSTE TURBINA	134
RENTABILIDAD Y VIABILIDAD ECÓNOMICA	134
CAPITULO VII	
CONCLUSIONES	138
LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	139

BIBLIOGRAFÍA

140

ANEJOS

CONJUNTO DE DATOS WANA

CALCULO EN MATLAB

PLANOS

CAPITULO I

PROBLEMÁTICA

En la actual situación que atraviesa la tradicional ingeniería civil, ciertamente estancada debido factores socioeconómicos que quedan fuera del motivo de este proyecto, decidí como futuro ingeniero civil que era hora de probar una de las ramas de nuestra ingeniería que se han aparcado como si de una ingeniería menor se tratase en los tiempos de bonanza y que actualmente parece una vía de escape para encontrar un hueco en el difícil mundo profesional, las energías renovables, tradicionalmente centradas en la energía eólica y fotovoltaica.

Tras cursar la asignatura de ingeniería marítima y ver el campo de la ingeniería aquí contenido en cuanto a las energías renovables y su reciente crecimiento, decidí usar el agua como fuente para este tipo de energía renovable porque creo que el océano y sus movimientos son una de las fuerzas de la naturaleza más poderosas que existen y que menos aprovechadas están a diferencia del viento o del sol. De los diferentes tipos de forma de energía que se nos presentan en los océanos y mares he escogido las olas posteriormente se explicará en detalle esta elección.

MOTIVACIÓN

La idea de este proyecto fin de grado por tanto consiste en idear un mecanismo capaz de conducir las olas para transformar y extraer su energía para mediante una turbina obtener energía eléctrica. La idea en sí es simple, tengo energía en las olas por su movimiento y quiero transformarla en energía eléctrica la complejidad reside en el proceso de transformación y aquí es donde se centra el grueso de mi proyecto porque quería retarme a mí mismo como ingeniero y por eso decidí que tenía que desarrollar desde cero el diseño del mecanismo para

poner a prueba los conocimientos adquiridos en estos cuatro años así como la capacidad para usarlos de la forma más correcta y eficiente.

Otro de los motivos de enfocar el proyecto de esta forma es medir mi capacidad de ingenio a la hora de resolver un problema del que a priori no tenemos ningún dato de partida, simplemente la idea y la inquietud de desarrollarla. Aquí juega un papel importante la imaginación, concepto que difícilmente se puede establecer dentro de unos límites porque cada cual podría, usando los diferentes principios que he empleado, visualizar varios tipos de mecanismos para extraer la energía distintos a los que aquí se exponen, con esto quiero decir que los diseños y resultados a los que llega este documento no son únicos.

CAPITULO II

ESTUDIO PREVIO

GLOSARIO

Energía undimotriz: Energía propia del oleaje.

Puntos WANA: Son una serie de boyas situadas en toda la costa española.

Streamline: Línea de corriente.

Diseño: Modelo, dispositivo.

kW: kilovatio.

MW: megavatio.

Dirección de propagación: Dirección del oleaje con la que avanzan desde la zona de generación.

Cavitación: Formación de burbujas de vapor en el agua debido a un aumento elevado de la velocidad y por tanto de la presión.

DISEÑOS EXISTENTES

Este apartado trata de recopilar los diseños que actualmente se están desarrollando en el campo de las energías renovables, concretamente la energía undimotriz por ser una de las formas de energía que contiene el mar con más potencial para su transformación en energía eléctrica debido a que el oleaje como grandes masas de agua en movimiento contiene una gran energía cinética así como potencial debido a la densidad del agua y al gran tamaño que pueden alcanzar determinadas olas. Dentro de los diseños que existen debemos diferenciar los fijos que están unidos al fondo marino de una forma rígida y los flotantes que se sitúan en la superficie y mediante cadenas con anclas se mantienen estáticos en una posición establecida.

Dentro de los tipos de diseños fijos que se están construyendo en la actualidad encontramos en primer lugar las llamadas Oscillating Water Column, OWC. Las OWC están formadas por una estructura hueca sumergida parcialmente la cual posee una abertura en la zona de contacto con el mar por su parte inferior. En el hueco interior de esta estructura se contiene un volumen, una columna, de aire limitado inferiormente por la superficie del agua y superior y lateralmente por las paredes de la estructura. El movimiento oscilatorio del oleaje sobre el aparato fuerza al volumen de agua a seguir este movimiento subiendo y bajando alternativamente con la consiguiente compresión y descompresión del volumen. Este tipo de diseño, se basa en el principio de la cavidad resonante. Si este movimiento del aire se le comunica a la atmósfera haciéndolo pasar por los alabes de una turbina, ésta extraerá energía mecánica del sistema y podrá usarse para generar electricidad mediante un generador eléctrico acoplado mecánicamente a la turbina. El tipo de turbina usualmente utilizada son las inventadas por el profesor Alan Wells y que reciben el nombre de su inventor, turbinas Wells. La peculiaridad de estas turbinas reside en su capacidad para rotar en el mismo sentido (Figura II.1) independientemente del sentido en que el flujo de aire pase por sus alabes de perfil simétrico.

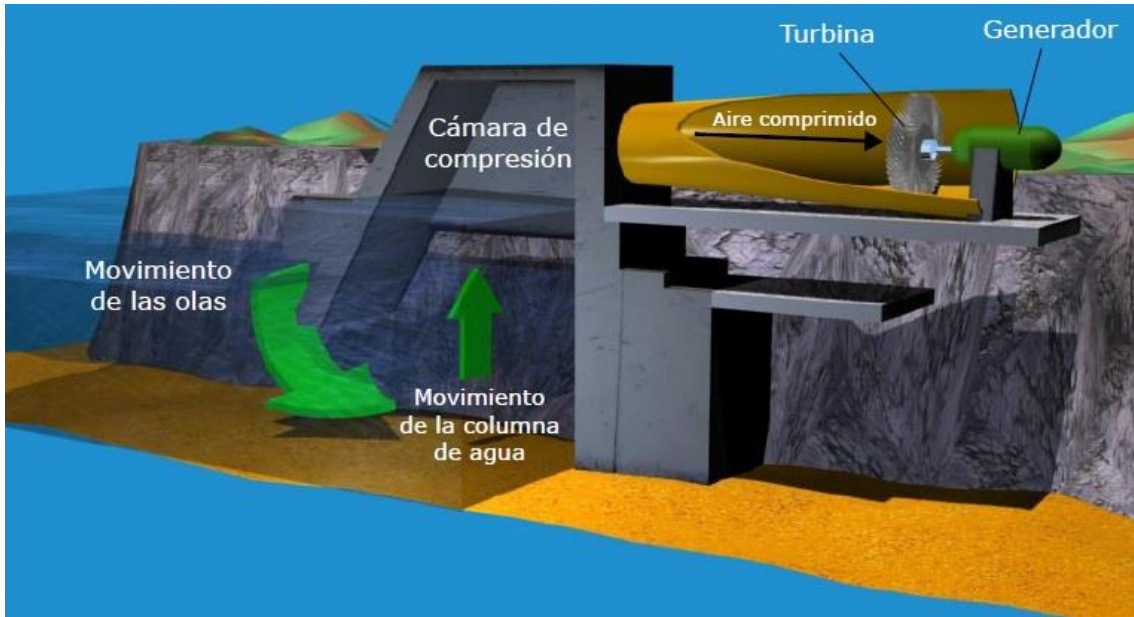


Figura II.1

Fuente: [1]

También existen otras variantes de este tipo de diseño que emplean válvulas y turbinas convencionales que giran en un solo sentido de giro para aprovechar las tanto las fuerzas de presión como las de succión. (Figura II.2)

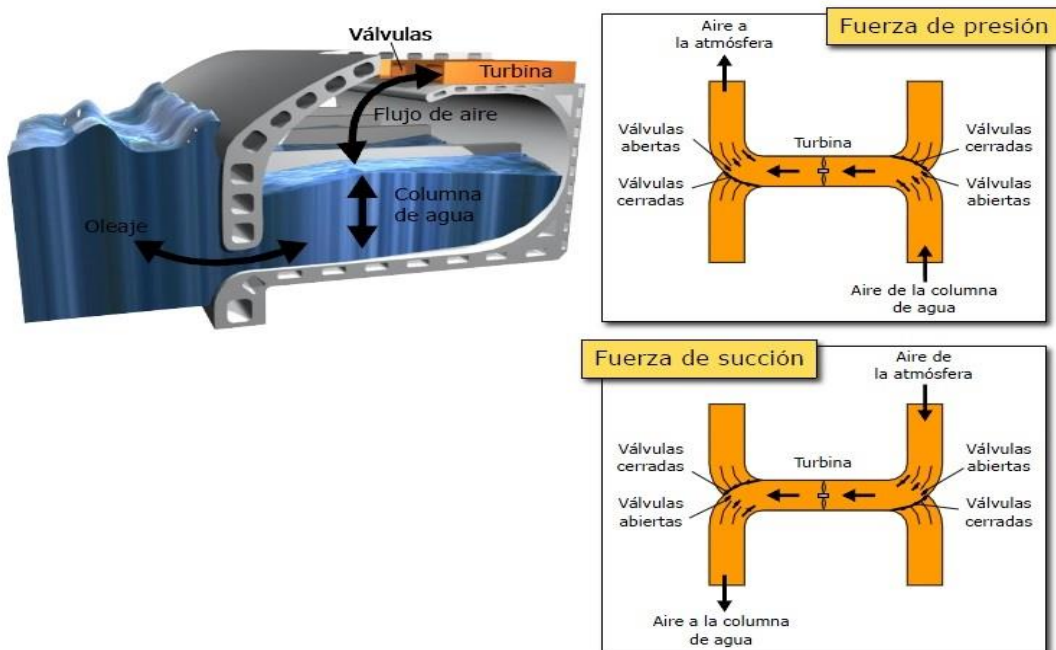


Figura II.2

Fuente: [1]

La potencia instalada de este tipo de diseños varía desde los 40 kW de la estructura instalada en Sanze, Japón, en 1983. (Figura II.3)



Figura II.3

Fuente: [1]

a los 500 kW del sistema instalado en Islay-Escocia, en 2001. (Figura II.4)



Figura II.4

Fuente: [1]

Un diseño más eficiente de las OWC es el OSPREY desarrollado por ART (Applied Research Technology) el cual tiene una potencia instalada de 2 MW. (Figura II.5)

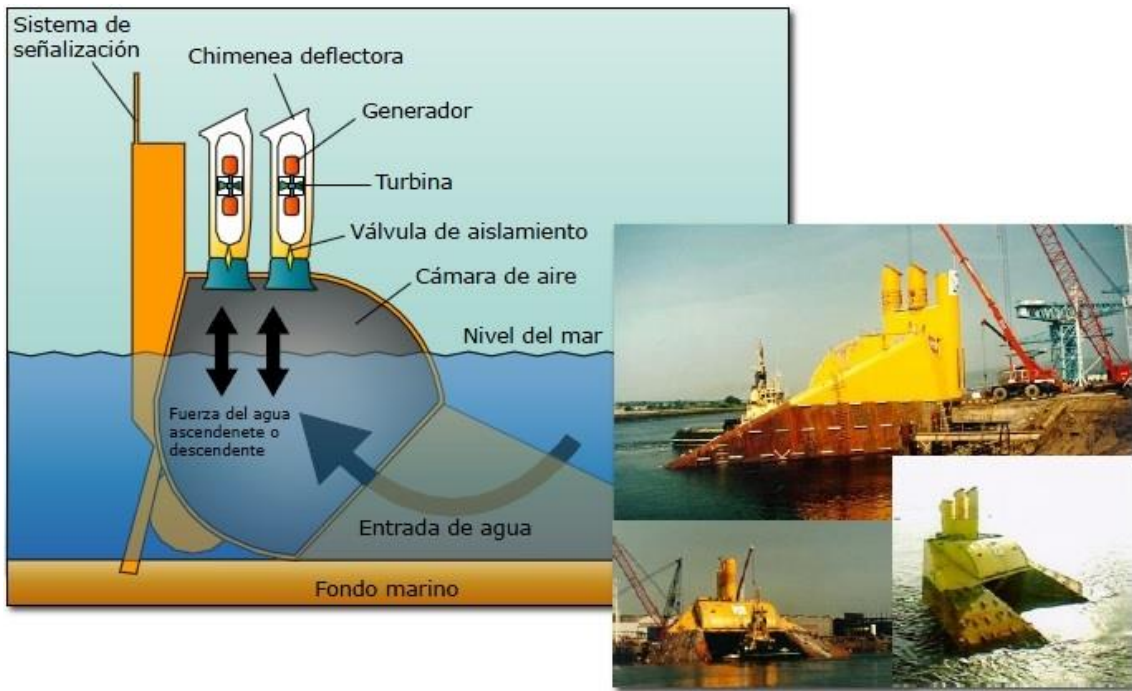


Figura II.5

Fuente: [1]

En segundo lugar en los diseños fijos encontramos los llamados Pendular que aprovechando el empuje de las olas mueve una compuerta vertical capaz de girar en su parte superior gira en unos rodamientos, mediante este giro se mueve un pistón hidráulico que mediante un sistema mecánico mueve un generador para producir electricidad. El instituto Tecnológico de Muroran (Japón) está desarrollando un dispositivo con una potencia de 150 kW cuya instalación está prevista en Yagishiri (Japón). (Figura II.6)

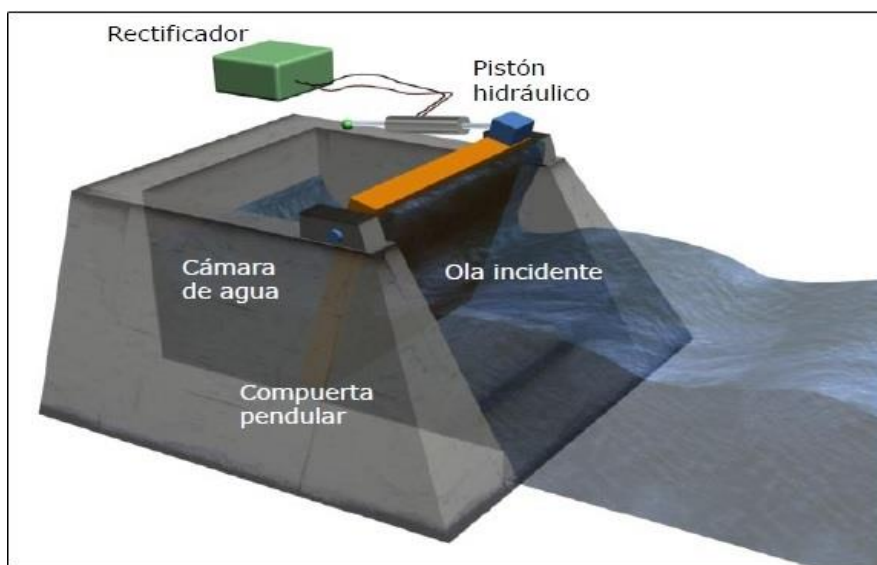


Figura II.6

Fuente: [1]

En tercer lugar en los diseños fijos encontramos los llamados canales ahusados o sistemas TAPCHAN, situados en la línea de costa formados por una estructura construida en un canal que consigue concentrar las olas para elevarlas a un depósito, transforman la energía cinética de las olas en energía potencial y se almacena el agua en dicho depósito. Mediante una turbina y un generador se consigue la energía eléctrica de la misma forma que en las centrales hidroeléctricas situadas en las presas, por diferencia de cotas dejando caer el agua por un conducto aumentando su velocidad hasta la turbina para hacerla girar. En Tasmania (Indonesia) y en Shetland (Escocia) son dos localizaciones en las que se baraja la opción de instalar este tipo de dispositivos cuya potencia instalada puede alcanzar los 350 kW. (Figura II.7)

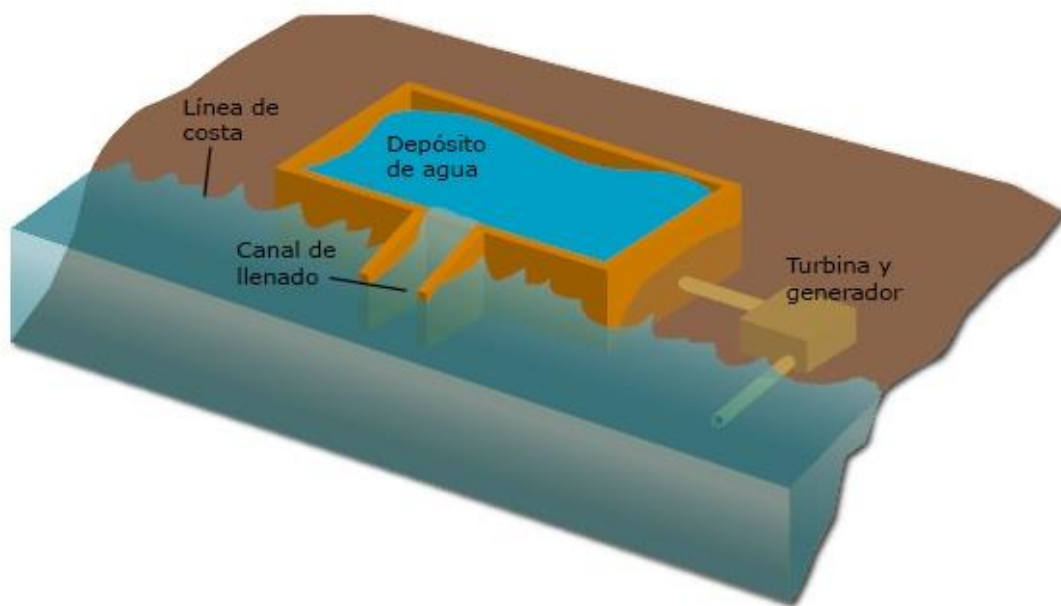


Figura II.7

Fuente: [1]

En cuarto lugar en los diseños fijos encontramos el llamado Rectificador Russell. Se trata de un aparato constituido por módulos que funcionan como si de una unidad individual se tratase y fijado al fondo marino, este tipo de dispositivos se usa en zonas de poca profundidad. Cada módulo consta de dos tanques situados a diferentes alturas, los cuales están comunicados mediante el uso de una turbina de pequeño salto. Debido al avance del oleaje, éste se encuentra con el dispositivo e impacta con el mismo siendo las crestas de las olas las que pasan la pared situada en el mar e introducen el agua en el tanque superior, que por acción de la fuerza de gravedad pasa al tanque inferior a través de los alabes de la turbina estando éstas últimas conectadas mecánicamente a generadores eléctricos encargados de producir la electricidad. Empleando un sistema de válvulas unidireccionales se permite la entrada del agua del tanque superior al inferior y la posterior salida de la misma por la parte sumergida de la pared situada en el mar. (Figura 11.8)

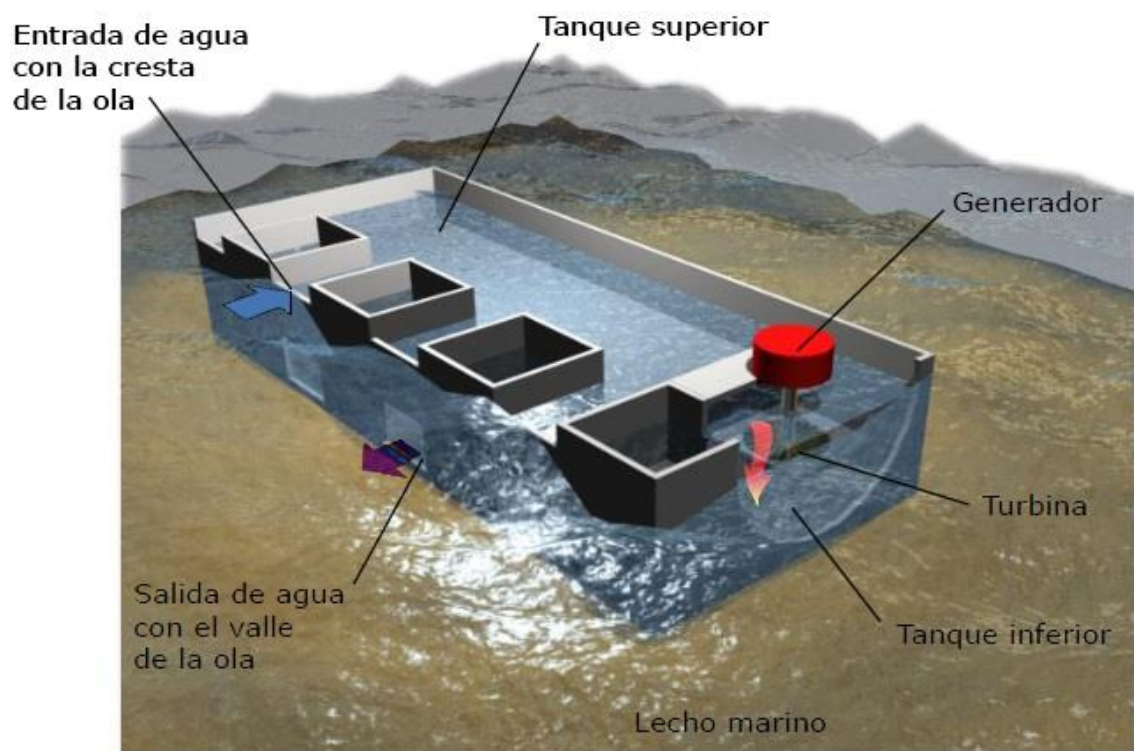


Figura 11.8

Fuente: [1]

Dentro de los tipos de diseños flotantes que se están construyendo en la actualidad es necesario hacer una reflexión previa necesaria, estos dispositivos oscilan con las olas. Por tanto es necesario proporcionar una

estructura principal o armazón estable de referencia, que puede ser exterior o interior como en dispositivos que a continuación se mostrarán, para que las partes activas del aparato, las encargadas de transformar la energía del oleaje en electricidad se puedan mover respecto de la estructura principal. Esta ausencia de oscilación se puede obtener aprovechando la inercia con masas que contrarresten el balanceo o proyectando una estructura suficientemente grande que se apoye en varias crestas y conseguir un grado de estabilidad razonable en la mayoría de los estados de la mar.

También deben permanecer en el lugar donde han sido fondeados y para ello se emplean sistemas de amarre como anclas o bloques de hormigón. Otra posibilidad en los sistemas de amarre la cual hace que técnicamente ya no sean dispositivos flotantes pero que es aquí donde se debe de considerar, son las estructuras en celosía que conectan el fondo marino con la estructura de superficie, es un término intermedio entre los diseños proyectados para que su construcción se realice en las líneas costeras y los diseños pensados para que floten. Esta tipología estructural que podría considerarse combinación de diseño fijo y diseño flotante aparece en dispositivos situados en zonas donde el lecho marino no está situado a profundidades superiores a los 100 metros, en apartados posteriores se mostrarán diferentes estructuras pertenecientes a esta posibilidad de anclaje.

En primer lugar encontramos un tipo de DWC, es decir aprovecha el principio de la cavidad resonante, situado esta vez en el interior de una boya. La Universidad de Queen (Irlanda del Norte) ha realizado la investigación de un dispositivo de este tipo denominado convertidor de Belfast que posee una estructura flotante con varias turbinas repartidas en el interior de la misma para poder captar las olas que tengan diferente dirección de propagación. (Figura 11.9)

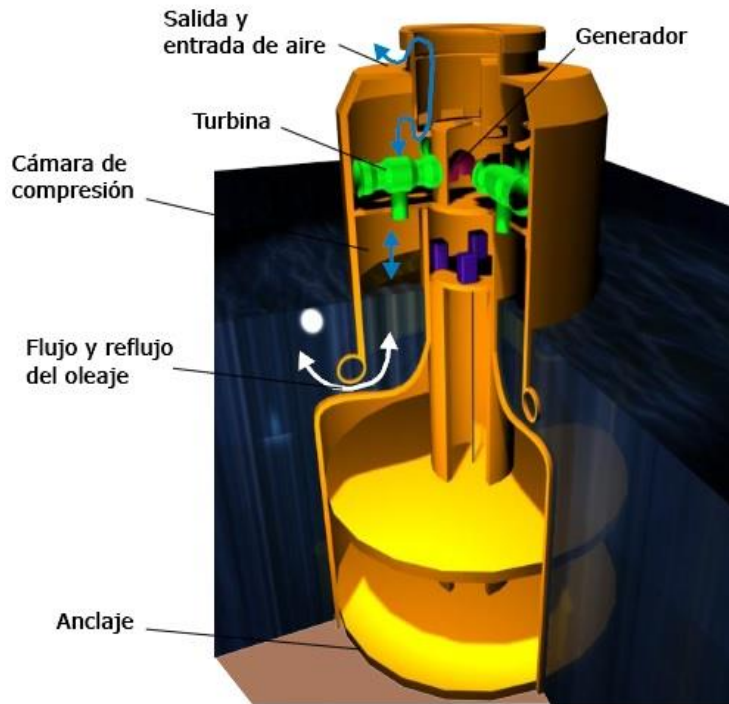


Figura 11.9

Fuente: [1]

En segundo lugar encontramos el dispositivo llamado Mighty Whale, la Gran Ballena, es el diseño flotante basado en el principio de las OWC más grande del mundo, botado en julio de 1988 por el Centro de Ciencia y Tecnología Marina de Japón. Amarrado en el fondo del mar con 6 cables a una profundidad de 40 metros y orientado de forma opuesta a la dirección predominante de las olas como se ve en la figura 11.10 y 11.11, tiene un desplazamiento de 4400 toneladas y unas dimensiones de 50 metros de largo por 30 metros de ancho. El dispositivo consta de 3 cámaras de aire que convierten la energía de las olas en energía neumática. Cada una de las 3 turbinas mueve un generador, de diferente potencia nominal: 50 kW, 10 kW y 30 kW, produciendo electricidad que es suministrada a áreas costeras cercanas.

Para periodos de reducida actividad de las olas se emplean baterías que aseguran que se pueda disponer de electricidad. Uno de los diferentes usos que se pueden dar a este dispositivo es ser usados para proporcionar energía a piscifactorías ubicadas en aguas en calma detrás del aparato y para la aireación, purificación de agua de mar. Este dispositivo ha estado operando a uno con 5 kilómetros de la Bahía de Gokasho, océano Pacífico.



Figura II.10 y Figura II.11

Fuente: [1]

Los dispositivos más desarrollados y habituales son los basados en las OWC, anteriormente mencionados aunque actualmente existen otros dispositivos que también están en fase de desarrollo y comercialización:

Uno de estos diseños diferentes se conoce como The Wave Dragon, El Dragón de Olas, el cual es una estructura metálica flotante que se basa en el mismo principio de los canales ahusados Tapchan, anteriormente comentados. Usa un par de brazos metálicos a modo de reflectores curvos para recoger y guiar las olas con el fin de que éstas accedan mediante una rampa para acabar en un depósito a partir del cual el agua es conducida a una turbina situada en la parte baja del cuerpo central del diseño que se encuentra sumergida. Este diseño ha sido sometido a varias pruebas con un modelo del mismo reducido a pequeña escala y se estima que la potencia máxima de generación en pico pueda alcanzar los 4 MW para la que se necesitarán unos brazos reflectores de cerca 227 metros.(Figura II.12 ,Figura II.13 y Figura II.14).



Figura II.12 y Figura II.13

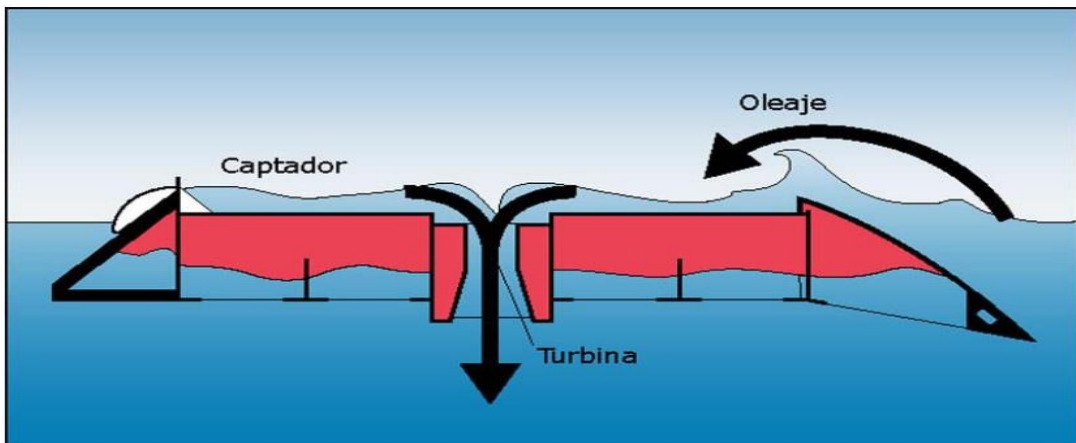


Figura 11.14

Fuente: [1]

Otro dispositivo similar al anterior es el denominado Wave Plane, Avión de Olas de invención danesa el cual es un dispositivo considerado flotante que es anclado al lecho marino para aprovechar tanto la energía cinética como potencial del oleaje. El diseño consta de una estructura metálica en forma de cuña con varios canales situados a diferentes alturas que recogen y transportan las olas hacia un depósito que tiene forma espiral en cuya parte más profunda se sitúa la salida del depósito que se conecta a un extremo de un conducto de inercia y en el otro extremo tiene conectada una turbina axial. (Figura 11.15).



Figura 11.15

Fuente: [1]

El diseño del depósito hace que el agua al avanzar hacia el tubo inercial origine un vórtice. La ola al entrar en la estructura es cortada en secciones por planos horizontales situados en la entrada del diseño, de esta forma se aprovecha tanto la energía cinética como la potencial. De estas rebanadas las situadas en la parte más baja de la ola es la que más energía cinética dispone y la parte más alta dispone de más energía potencial. Esta discretización de la ola es usada para dar un suministro de agua continuado al conducto de inercia durante todo

el periodo de la ola. Este aparato se basa por tanto en el principio de Bernoulli ya que al reducir la sección se aumenta la velocidad. (Figura II.16 y Figura II.17).

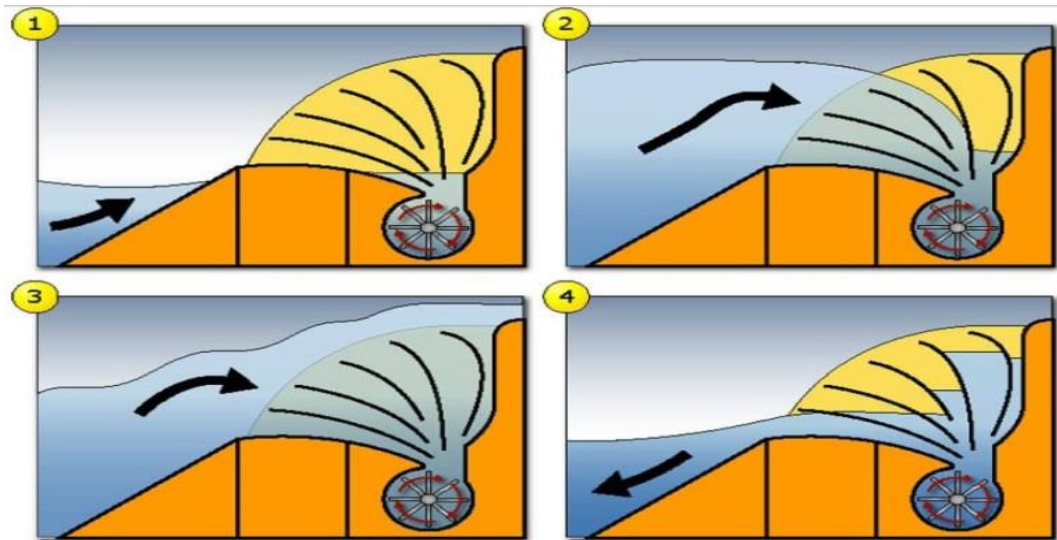


Figura II.16

Fuente: [1]



Figura II.17

Fuente: [1]

Otro de dispositivo flotante es el denominado Pato Salter, que mediante un movimiento de rotación alternativo consigue convertir tanto la energía cinética como la potencial para obtener electricidad mediante un generador. (Figura II.18).

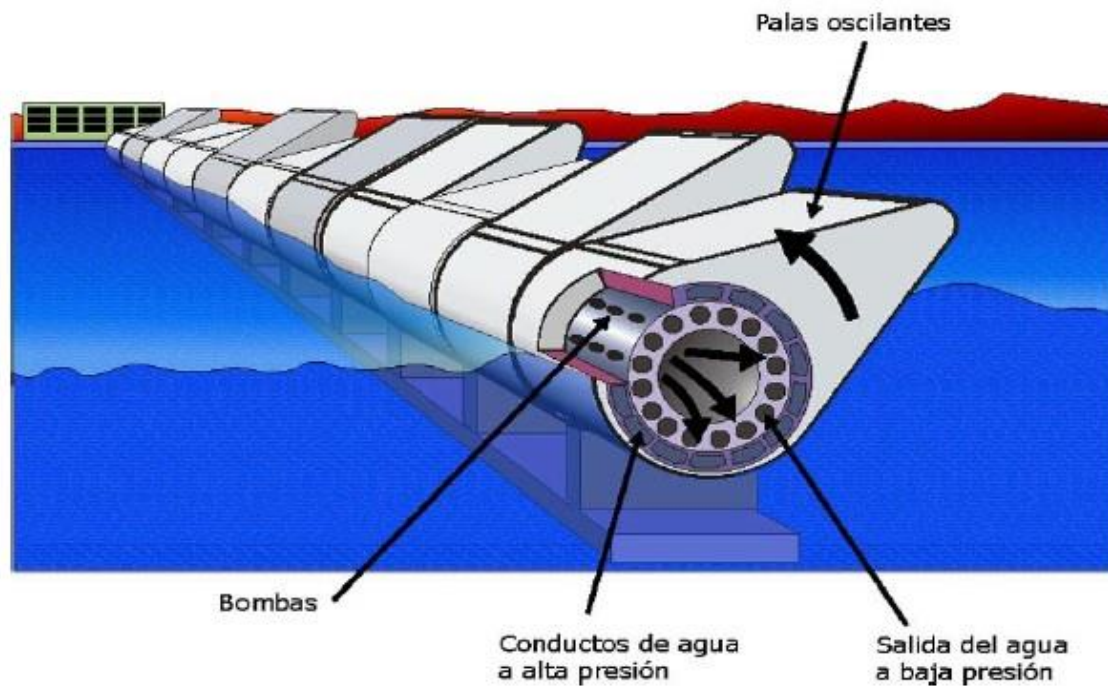


Figura II.18

Fuente: [1]

El denominado Pelamis es una estructura metálica, compuesta por segmentos cilíndricos conectados por uniones articuladas, el cual pertenece al grupo de dispositivos conocidos como atenuadores, que son aquellos en los que su eje principal es situado paralelo a la dirección en que se propaga el oleaje y por tanto perpendicular al frente de olas. Los segmentos cilíndricos que constituyen el diseño se mueven unos respecto a los otros debido al movimiento oscilatorio de las olas. En el interior de los segmentos se sitúa una serie de pistones hidráulicos en la zona de las articulaciones conectados con los segmentos contiguos y debido al movimiento relativo de unos segmentos respecto a los otros por la acción del oleaje estos pistones bombean aceite que acciona un motor hidráulico acoplado mecánicamente a un generador eléctrico. La electricidad generada en cada articulación se transmite a la costa por un cable submarino común. Las dimensiones del Pelamis son de unos 130 metros de longitud y 3.5 metros de diámetro. La potencia nominal eléctrica del mayor dispositivo de este tipo es de 0.75 MW. (Figura II.19 y Figura II.20).



Figura II.19

Fuente: [1]



Figura II.20

Fuente: [1]

El último dispositivo que aquí se expone ha sido desarrollado por Archimedes Wave Swing (AWS) el cual es un sistema sumergido totalmente, extrae energía de las olas empleando el movimiento vertical de subida y bajada de las mismas. La energía de las olas es transmitida mediante un movimiento relativo lineal entre un cilindro

exterior móvil o flotador y otro interior fijo y anclado al fondo marino. Mediante imanes situados en el cilindro exterior los cuales se mueven a lo largo de una bobina para generar electricidad. Actualmente hay situado un prototipo de 2 MW de potencia nominal en las costas de Portugal. (Figura II.21, Figura II.22 y Figura II.23).

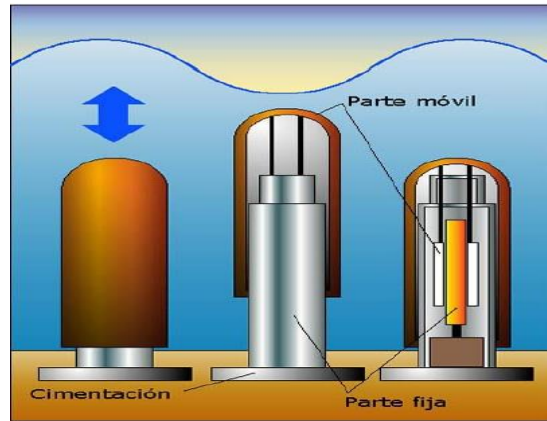


Figura II.21

Fuente: [1]

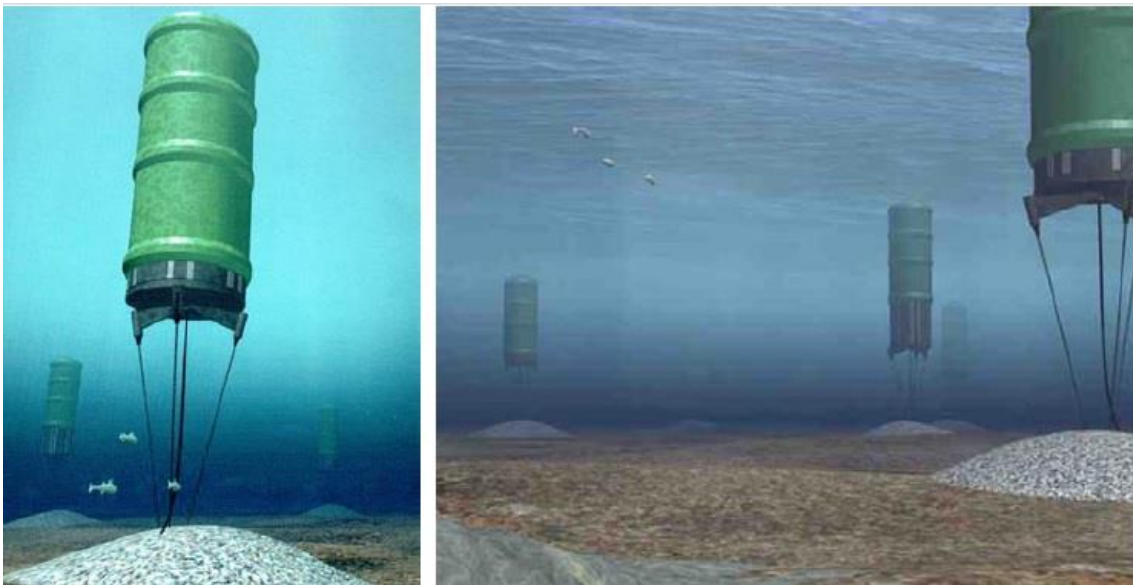


Figura II.22

Fuente: [1]



Figura 11.23

Fuente: [1]

Se puede concluir que la gran ventaja de los dispositivos flotantes es la capacidad de los mismos para explotar las olas con más energía situadas a partir de profundidades donde la ola no se vea afectada por el fondo marino y comience a cambiar su geometría invirtiendo energía en este proceso.

TIPOS DE ESTRUCTURAS MARINAS

En este apartado se presenta la tipología estructural situada en alta mar también denominadas estructuras offshore donde podemos diferenciar dos grandes grupos, las estructuras apoyadas en el fondo marino y las flotantes. Con el fin de identificar las diferentes soluciones adoptadas, se debe detectar las solicitaciones a las que la estructura se enfrentará a lo largo de su vida útil, para el dimensionamiento de la superestructura y tener unos valores de las fuerzas que se necesitan transmitir al fondo marino para poder situar la estructura en su posición definitiva sin que sufra desplazamientos significativos que alteren las condiciones de trabajo en las que fue proyectada.

Principalmente en medio del océano tenemos que el oleaje junto con el viento son las dos principales acciones que la estructura debe soportar, además del peso propio de la misma, las cuales nos proporcionan una serie de fuerzas que nos servirán para el dimensionamiento de la superestructura y de varias de las dimensiones de la estructura portante. La condición por excelencia que regirá la elección de un tipo u otro de estructura es la profundidad a la que se encuentre el fondo marino y que lógicamente también será la profundidad de la estructura portante, por este hecho hay ocasiones que construir una estructura de hormigón, en forma de pilotes, o de acero, en celosía, sería inviable por las dimensiones que tendría la misma y los costos que se generarían.

Aquí es donde las estructuras flotantes juegan su ventaja, no necesitan de una estructura para ser conectadas al lecho marino, simplemente con el empleo de cables y anclas o de contrapesos y cables se sitúan de forma permanente en su posición de trabajo con lo que pueden situarse en localizaciones de mucha más profundidad. Este hecho es el que también ha condicionado este proyecto y más adelante se mostraran la serie de diseños que conforman el grueso del trabajo. A continuación se muestran los diversos tipos de esta clase de estructuras.

Las plataformas del tipo Jackup Rigs se utilizan en aguas poco profundas de hasta unos 100 metros de profundidad y una vez situadas en el lugar de trabajo se bajan las patas que pueden ser 3 o 4 según se ve en las fotografías siguientes y se anclan al lecho marino. (Figura II.24, Figura II.25)



Figura II.24

Fuente: [2]



Figura II.25

Fuente: [3]

Otro tipo de plataforma son aquellas denominadas plataformas de gravedad, llamadas así porque se asientan y estabilizan sobre el fondo marino bajo su propio peso. La *Statfjord-B* es una de estas plataformas situada en el Mar del Norte al noreste de las islas Shetland. Tiene unos 270 de altura respecto al fondo marino. (Figura II.26, Figura II.27)



Figura II.26

Fuente: [4]



Figura 11.27

Fuente: [5]

Para profundidades mayores encontramos las plataformas semi-sumergibles que están formadas por varios pontones que le proporcionan la flotabilidad necesaria para ser estables y poder navegar con facilidad. Pueden desempeñar sus funciones en un rango de profundidades comprendidas entre setenta y mil metros amarrados con sistemas de cables y anclas. Para profundidades superiores a los 1000 metros se emplea un sistema de posicionamiento dinámico. . (Figura 11.28, Figura 11.29)



Figura 11.28

Fuente: [6]



Figura 11.29

Fuente: [6]

Dentro de estas estructuras encontramos barcos construidos para portar un equipo perforador completo en su cubierta, son los llamados barcos perforadores, Drillships. Operan en profundidades similares a las de las plataformas semi sumergibles con métodos de fondeado similares, empleados para áreas lejanas porque gracias a su autonomía y movilidad necesitan un apoyo limitado. El casco del barco posee un abertura por la cual puede descender la perforadora se que conoce como la piscina de la luna, moon Pool. (Figura 11.29).



Figura II.30

Fuente: [2]

CAPITULO III

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

METODO PARA FIJAR LOCALIZACIÓN

Para este apartado es necesario empezar resaltando que el dispositivo se sitúa aguas españolas. En un principio a todos se nos viene a la mente que si necesitamos una zona de la geografía española donde tenga un mar que produzca gran cantidad de oleaje aparecen tres localizaciones en nuestra mente; Galicia, Cádiz y Canarias, pues bien para decir por uno de ellos se consideró oportuno buscar información sobre la energía del oleaje en cada zona y este mapa refleja de forma resumida y directa esta energía del litoral español. (Figura III.1)

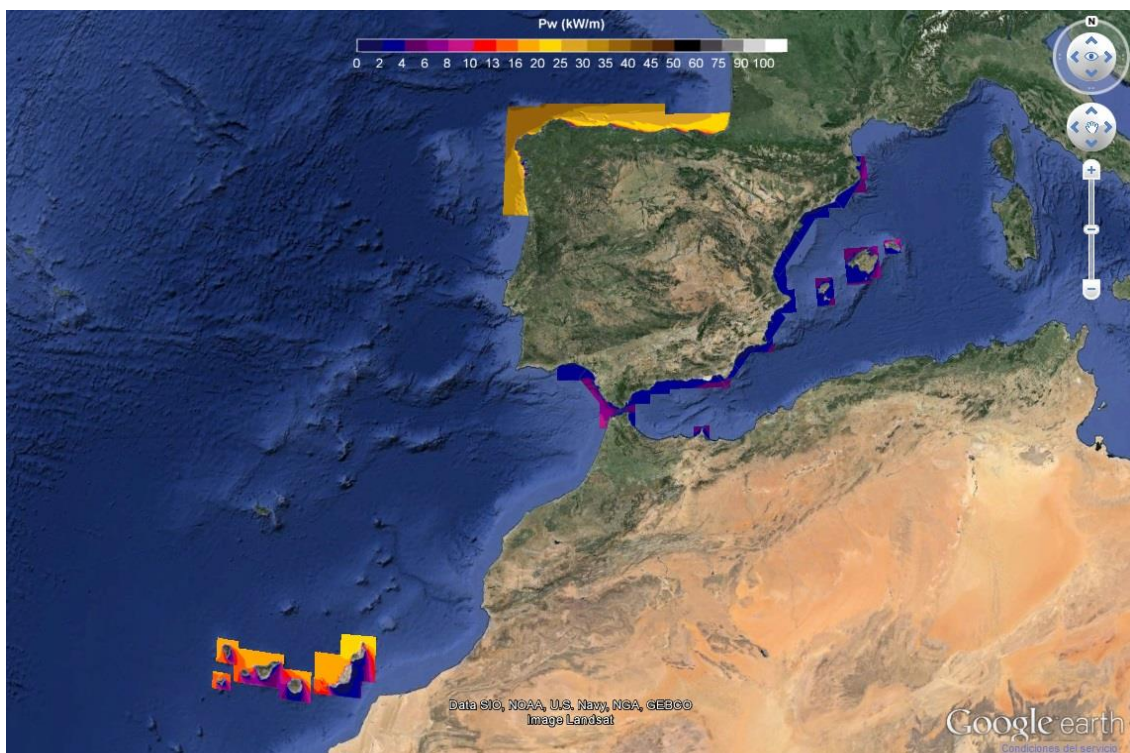


Figura III.1

Fuente: [7]

En este mapa se aprecia la potencia media anual por metro de ancho de ola, con esto vemos que las zonas más energéticas son la costa Gallega y la Canaria, para poder diferenciarlas con claridad se pasa a mostrar este mismo mapa haciendo zoom en cada costa por separado. (Figura III.2 y Figura III.3).

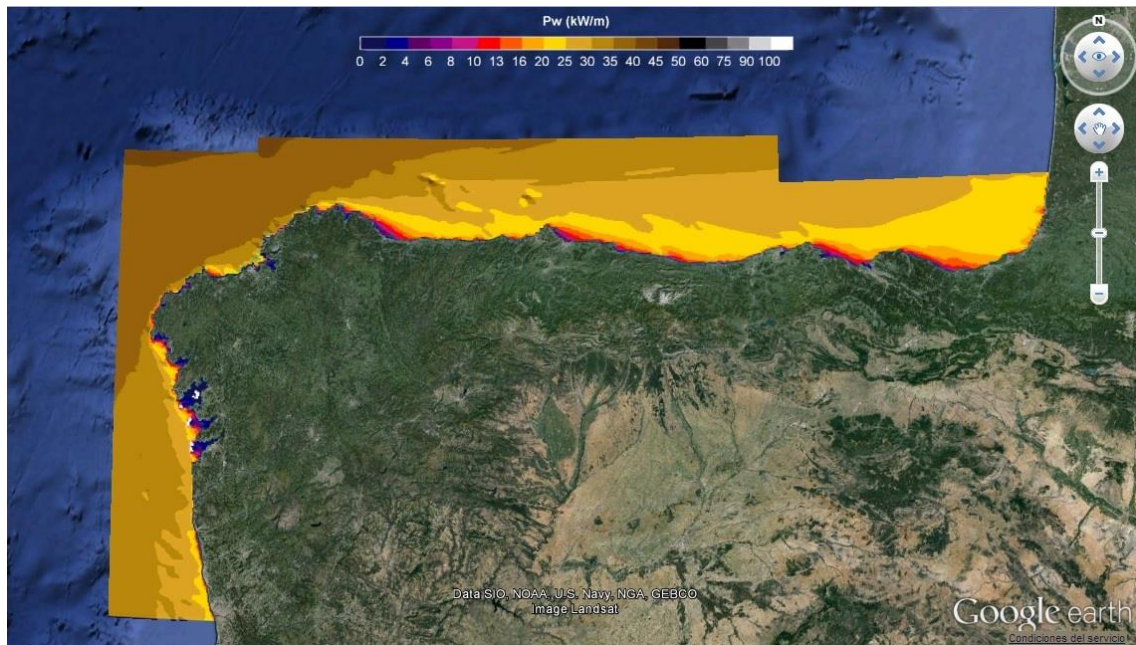


Figura III.2

Fuente: [7]

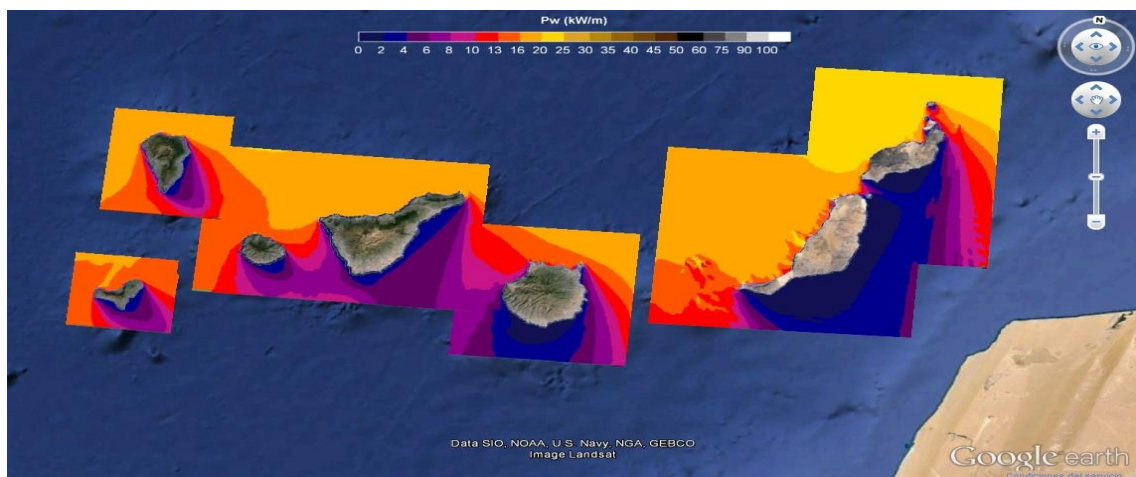


Figura III.3

Fuente: [7]

Se aprecia como la zona costera gallega alcanza potencias de 45 kW/m mientras que la canaria se queda en unos 25 kW/m, por este motivo la zona en la que se va a situar el dispositivo es en las aguas próximas a Galicia. Ahora queda conocer la proximidad de la costa a la que debe de situarse el diseño para que sea capaz de aprovechar al máximo la energía del oleaje, para ello empleamos otro mapa, siguen reflejando la potencia media anual por metro de ancho de ola, que señala los puntos situados en aguas de profundidades de 20, 50 y 100 metros así como en profundidades indefinidas. (Figura III.4).

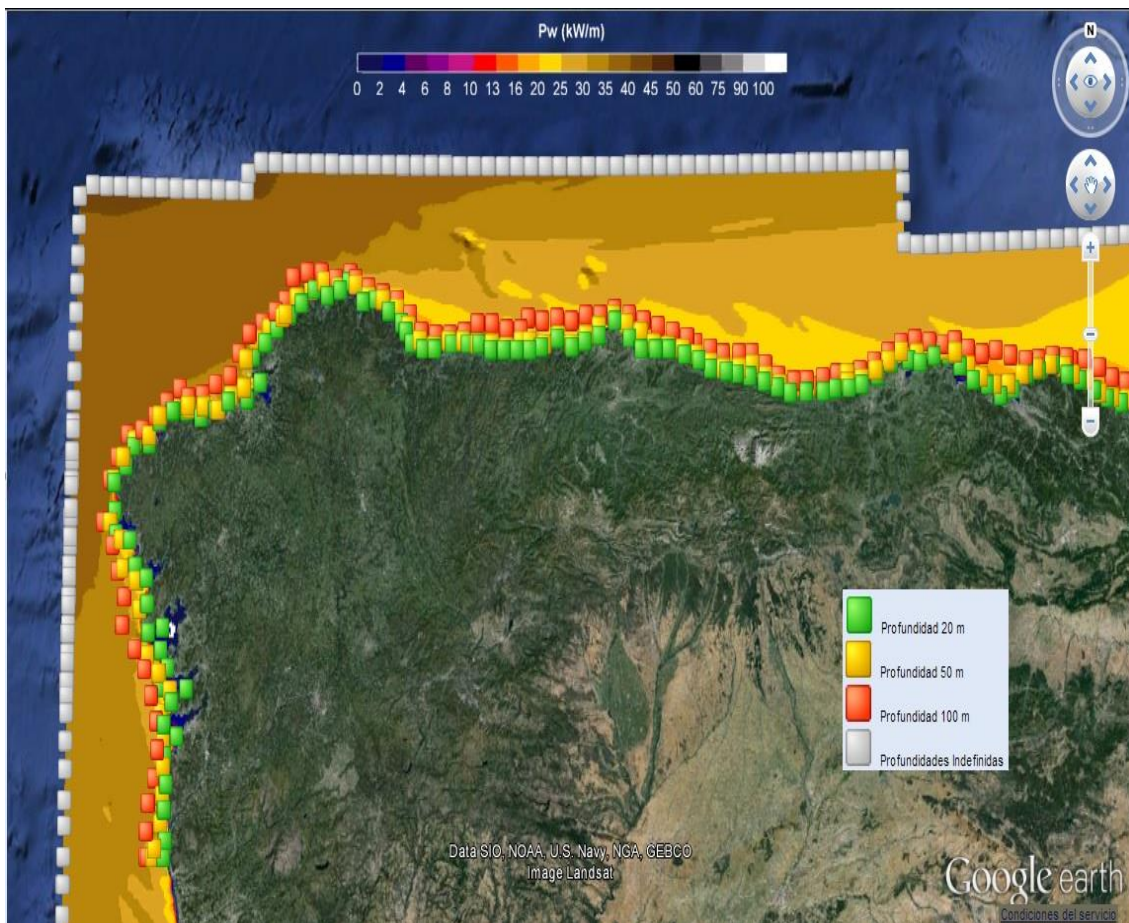


Figura III.4

Fuente: [7]

Se observa como los puntos más energéticos son los situados en la zona de profundidad indefinida, por lo tanto el diseño se situará lo más próximo a ellos pero teniendo en cuenta tanto la propia profundidad del fondo marino en esos puntos como la distancia a la costa para el transporte de la energía eléctrica producida por el

dispositivo. Siendo este último parámetro más restrictivo que la profundidad, más adelante se desarrollará el porqué de escoger un diseño de estructura flotante, porque nos condiciona la longitud del cable marino necesario para ese transporte energético y por tanto los costes del diseño.

En los siguientes mapas se pasa a presentar las potencias que tiene el oleaje en diferentes estaciones meteorológicas ordenados de menor a mayor potencia por metro de ancho de ola para concienciarnos de la diferencia de energía que posee el oleaje, pero con la constancia de su presencia durante todo el año, gracias a esto la energía del oleaje tiene una gran proyección de futuro en cuanto al aprovechamiento eléctrico se refiere. (Figura III.5, Figura III.6 y Figura III.7).

Verano

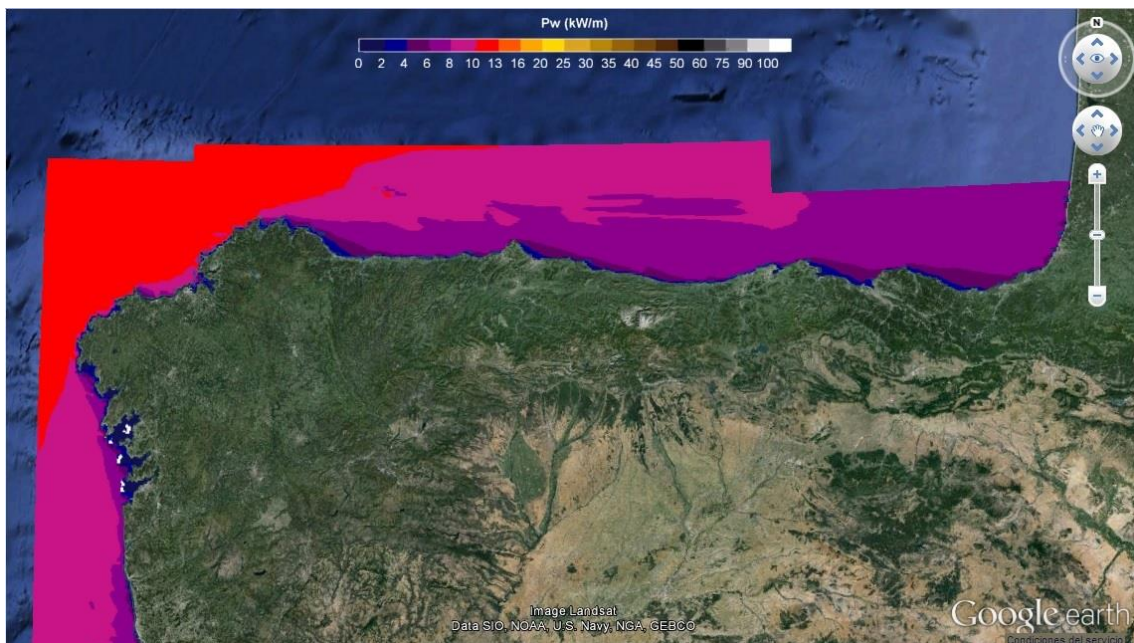


Figura III.5

Fuente: [7]

Otoño

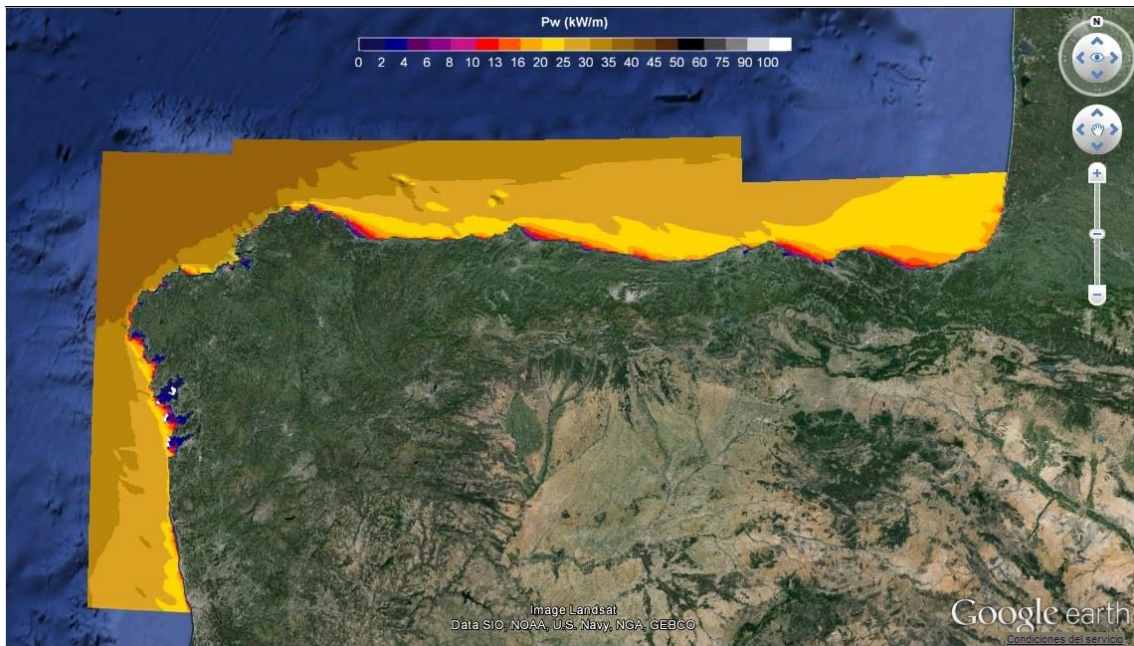


Figura III.6

Fuente: [7]

Invierno

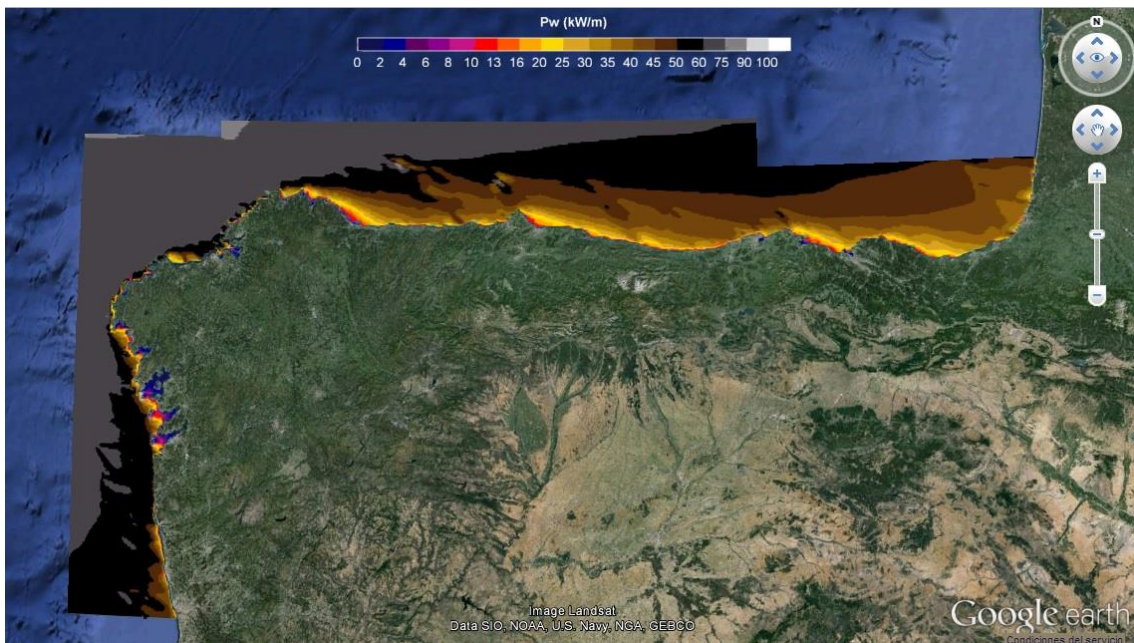


Figura III.7

Fuente: [7]

Después de esta primera selección de la zona geográfica más adecuada para situar el dispositivo se pasa a profundizar en la localización exacta que mejor se adapta a las necesidades del proyecto mediante el análisis de los puntos WANA.

CÁLCULO PUNTOS WANA

En primer lugar es necesario explicar el concepto de punto WANA para poder desarrollar los cálculos de manera que tengan relación lógica con el propósito principal de este trabajo, elaborar el diseño de un dispositivo para aprovechar la energía del oleaje.

Los conocidos como puntos WANA son boyas situadas estratégicamente en el litoral español que transmiten con una cadencia determinada datos relevantes sobre el oleaje: altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de propagación, etcétera. Estos puntos llevan en funcionamiento de forma ininterrumpida desde 1995, salvo averías localizadas, con lo que se dispone para la envergadura de este proyecto de una serie temporal de datos de una magnitud bastante aceptable para el uso de los mismos sin necesidad de hacer modelos estadísticos de predicción del oleaje a largo plazo. Para tener acceso a estos datos es necesario contactar con Puertos del Estado y tras rellenar una solicitud, se recibió la información de una serie de puntos situados en la zona de la costa gallega que a continuación se muestran en un mapa (Figura III.8), los cuales se identifican con un número.

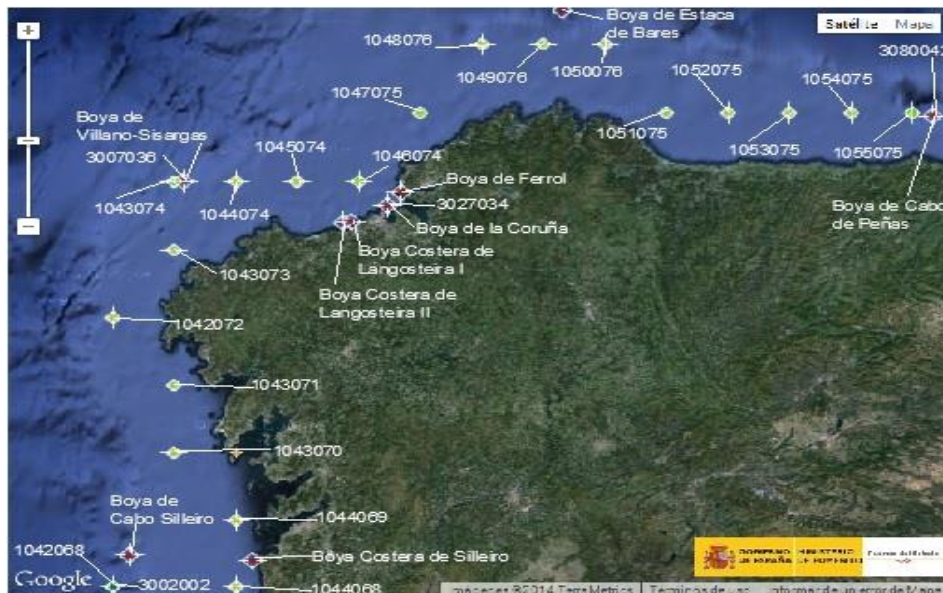


Figura III.8

Fuente: [8 y EP]

En el anejo CONJUNTO DE DATOS WANA se adjunta el informe que se puede conseguir de la página web de Puertos del Estado sobre los puntos WANA.

Para el tratamiento de los datos de cada uno de estos puntos WANA, se solicitó y analizó un total de 24 de ellos, se ha empleado el programa de cálculo Matlab, el desarrollo del código empleado se adjunta en el anejo CALCULO EN MATLAB. En primer lugar es necesario mencionar que esta serie de puntos posee una cadencia para la obtención de datos de tres horas antes de 15/12/2011 y de una hora a partir de esa fecha, por lo tanto para poder realizar los cálculos que posteriormente se expondrán se realizaron dos pasos previos: el primero fue separar el archivo donde viene la serie de datos completa en dos archivos diferentes uno con todos los datos con cadencia de tres horas y otro con todos los datos con cadencia de una hora. El segundo paso previo consistió en la realización de una interpolación en los datos de cadencia de tres horas para obtener a partir de éstos una nueva serie de datos con cadencia de una hora para poder unirla con los datos existentes que ya poseían la cadencia de una hora. Esta interpolación se realizó con las herramientas de las que Matlab dispone para ello y se comprobó empleando la variable estadística; desviación estándar.

En segundo lugar hay que mencionar que los datos de los puntos WANA son datos horarios medios, en el caso de la cadencia de tres horas son datos medios de esas tres horas, con esto se pretende explicar que la intención de realizar la interpolación reside en conseguir esos dos datos medios que faltarían en el intervalo de tres horas de una forma que nos permita que estos datos puedan recibir el mismo tratamiento de cálculo que los que ya tienen cadencia de una hora.

Esto es así porque se ha empleado el uso de vectores para el tratamiento de los datos. Los datos con cadencia de una hora se introducen en vectores diferentes de los de cadencia de tres horas, posteriormente se realiza la interpolación de éstos datos introduciéndolos en otros vectores distintos y por último se unen los vectores con cadencia de datos de una hora. A continuación se exponen los diferentes datos que se han empleado así como la teoría empleada para su tratamiento.

En este capítulo de Cálculo de puntos WANA se trata de identificar cuál de estos puntos es el más energético para ello es necesario conocer la teoría por la que se rige el comportamiento de las olas, lo que va a conseguir

que se comprenda parte de las decisiones tomadas en capítulos posteriores. Para comenzar este cálculo es necesario partir de unas hipótesis teóricas:

Primera hipótesis: la localización del aparato se fijará en las coordenadas del propio punto WANA, esto es así debido a que este proyecto se centra en el diseño del dispositivo y no tanto en la creación de un parque de los mismos cuya localización podría ser otra que se adapte mejor a la optimización y explotación de estos diseños.

Segunda hipótesis: los datos de oleaje deben de considerarse, siempre, datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas. (Anejo CONJUNTO DE DATOS WANA página 2)

Tercera hipótesis: El oleaje se considerará del tipo mar de fondo o swell, es decir que conserva su carácter sinusoidal, no se ha producido la deformación del perfil.

Dentro del archivo que contiene toda la información de los puntos WANA se encuentran los parámetros que se han empleado para poder desarrollar el estudio del oleaje para posteriormente calcular la energía, que son: Altura de ola significativa espectral, periodo de pico espectral, dirección media de procedencia del oleaje y año. Estas hipótesis de partida nos condicionan la forma de abordar el estudio del oleaje en los puntos.

En primer para poder considerar que el oleaje es swell se necesita comprobar el carácter lineal del mismo, ya que la teoría lineal representa con bastante exactitud este oleaje. Para ello se debe cumplir la siguiente condición: $Ak \ll l$, es decir que la amplitud de onda, A, por el número de onda, k, sea mucho menor que l, parámetros que posteriormente como se han calculado. (Figura III.9).

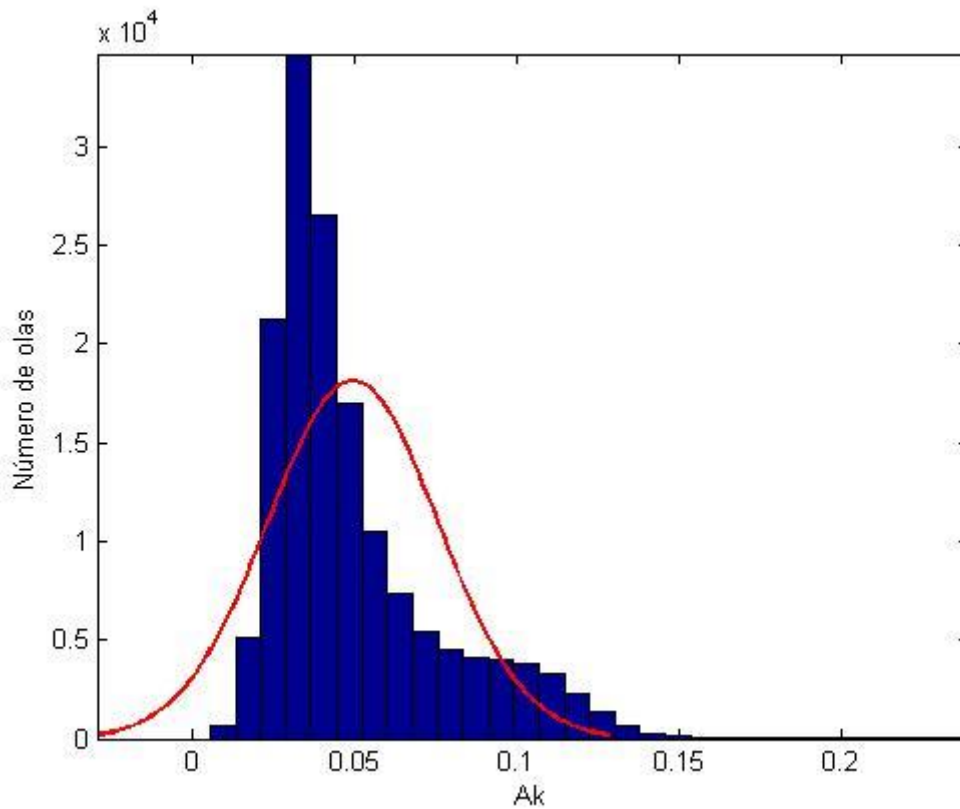


Figura III.9

Fuente: [EP]

En la figura anterior se observa que esta hipótesis es cumplida por un número elevadísimo de las olas de un determinado punto, éste será en el que después se sitúe el dispositivo y se explicará el porqué. Así que la hipótesis de partida se ve verificada y se puede pasar a realizar el cálculo de la energía de los puntos. Nos basaremos en la teoría del libro de Fundamentos del Movimiento Oscilatorio [L1] en su apartado 5.2 energía espacial media en la columna de agua. Solamente es de interés la energía cinética por ser la que este dispositivo trata de aprovechar en el movimiento del oleaje, su ecuación es:

$$E_c = \int_x^{x+L} E_{c,inst} dx = \int_x^{x+L} \frac{E}{2} \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \cos^2 \psi + \left(1 - \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \sin^2 \psi \right] dx = \frac{L}{4} \rho g A^2$$

Se empleará además, de esta forma la ecuación para poder calcular la energía de cada una de todas las olas de la serie de datos modificada con cadencia de una hora y para poder sacar la potencia que no es más que la energía por unidad de tiempo. El siguiente paso sería calcular las características de cada ola, es decir su amplitud, periodo y longitud, parámetros imprescindibles para realizar los cálculos aquí presentados. En primer lugar al haber considerado que se emplea la teoría lineal, la amplitud de ola corresponde con la mitad de su altura, $A = H/2$, medido en metros, el periodo es el correspondiente con el que se proporciona con los datos de los puntos, T en segundos.

Antes de calcular la longitud de onda es necesario introducir otros conceptos teóricos, la frecuencia angular, $\sigma = 2\pi/T$, y la ecuación de dispersión que relaciona el periodo, T a través de σ , la profundidad h y el parámetro $k = 2\pi/L$, conocido como número de onda, libro de losada.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

que para profundidades indefinidas se simplifica haciendo uso del valor asintótico de $\tanh kh$ cuando $kh \rightarrow \infty$.

$$\sigma^2 = gk$$

ya estamos en disposición de calcular la longitud de onda L como;

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \rightarrow L = \frac{g T^2}{2\pi}$$

Realizamos los cálculos de la amplitud y longitud de onda de cada uno de los datos del punto, con esto se puede pasar a calcular olas que hay en una hora de datos, se reitera que son datos horarios medios, con la siguiente ecuación:

$$N^{\circ}olas = \frac{3600s}{T}$$

Con estas ecuaciones y los datos podemos calcular la energía del punto en cada año de la serie estas operaciones se han realizado para todos los puntos, en este apartado se expone los resultados del punto más energético.

La primera figura (Figura III.10) representa la altura de olas y el número de las mismas que tienen dicha altura, parámetro fundamental que nos condicionará las dimensiones de la entrada del agua al aparato.

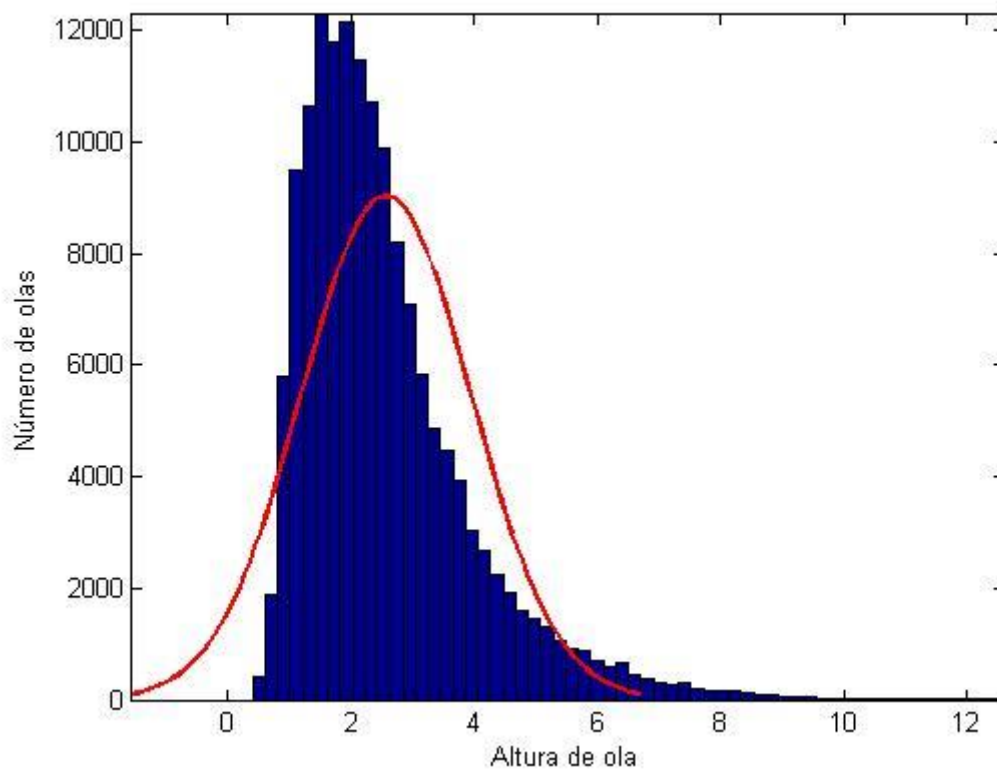


Figura III.10

Fuente: [EP]

Como se puede apreciar el grueso de las olas posee una altura de dos a tres metros y a partir de los cinco la cantidad de olas cada vez disminuye más rápidamente, por este motivo se ha decidido que la altura de ola máxima que el diseño es capaz de aprovechar sea de cinco metros, debido también a que alturas de ola

superiores a ésta hacen que las dimensiones del diseño sean demasiado grandes para garantizar la estabilidad del mismo en el momento de aprovechar el oleaje.

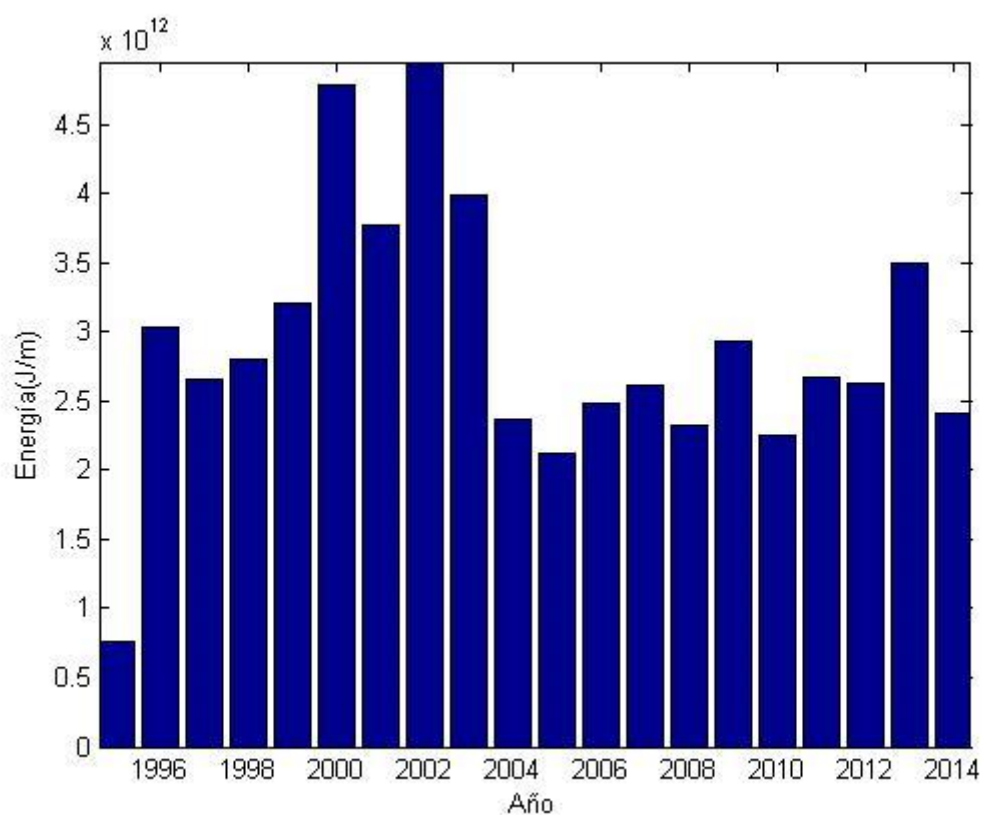


Figura III.II

Fuente: [EP]

Esta gráfica (Figura III.II) recoge el principal propósito de este capítulo, la obtención de la energía de los puntos. La energía está calculada por metro de ancho de frente de ola con lo cual se dispone de un potencial energético para su aprovechamiento bastante elevado, esto confirma lo que se expuso al principio de la redacción en la que se seleccionaba dentro de los diferentes tipos de energías marianas la energía del oleaje, por su gran potencial energético.

A continuación se calcula otro parámetro muy importante para el diseño de un dispositivo que aprovecha la energía de las olas y es su dirección de procedencia predominante ya que éste deberá de orientarse hacia las mismas para poder realizar el aprovechamiento. Se procede de forma similar con el tratamiento de los datos realizando una interpolación para que todos los datos tengan cadencia de una hora y su tratamiento sea viable (Figura III.I2). El resultado es el siguiente:

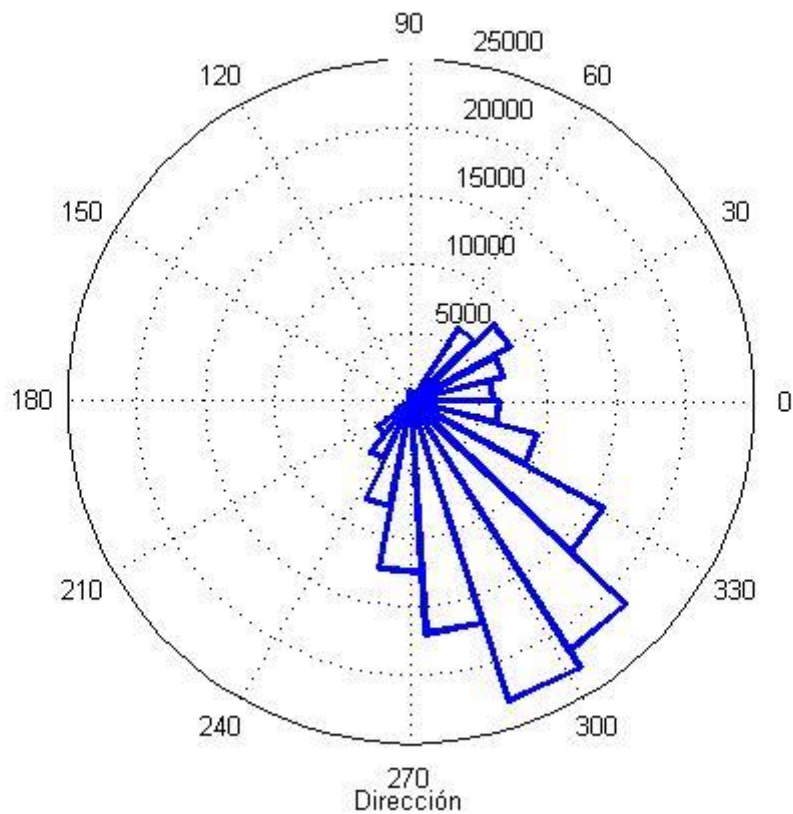


Figura III.12

Fuente: [EP]

Se puede observar como el grueso del oleaje tiene dirección comprendida entre los doscientos setenta y los trescientos treinta grados, pero vemos dentro de este intervalo se concentran las olas entorno a más menos quince grados respecto de la dirección doscientos noventa grados, por tanto ésta será la dirección en la que se fije el dispositivo y se le permitirá una rotación de más menos quince grados respecto a ella.

En la siguiente figura (Figura III.12) se ordenan de mayor a menor todas las alturas de ola,

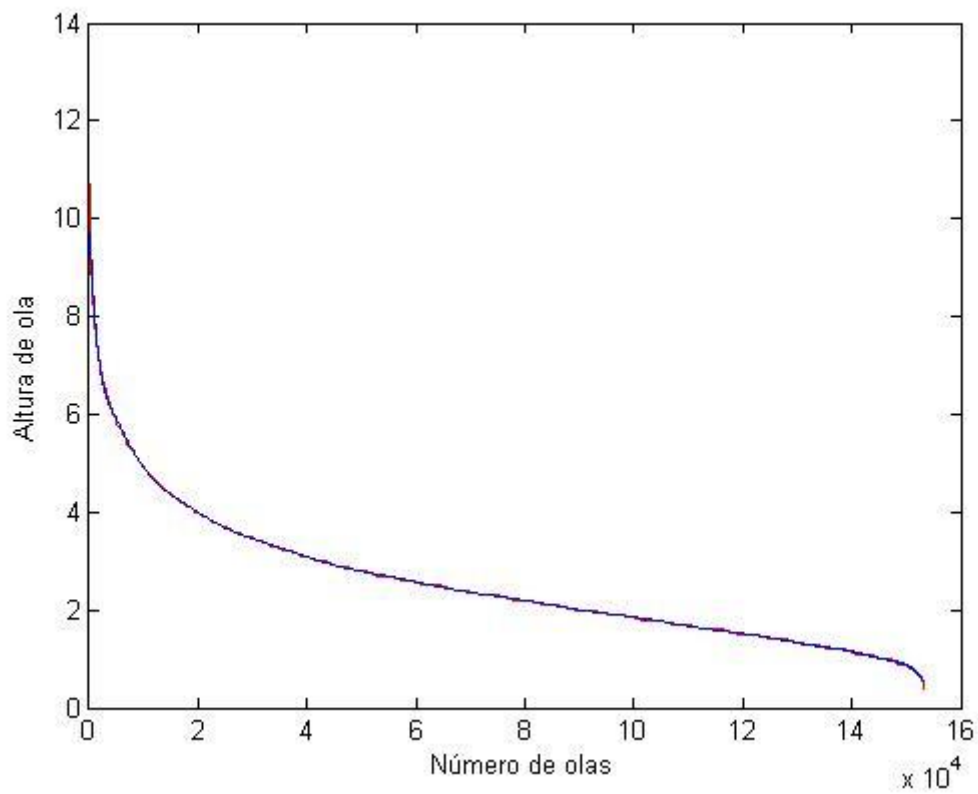


Figura III.13

Fuente: [EP]

esto creará una figura la cual se ha tratado de imitar en el tubo del dispositivo como primera idea de cómo debería de ser el interior del mismo.

Como punto final a este capítulo de cálculo de los puntos se adjunta una tabla (Tabla III.I) recopilatorio de la energía y potencia media horaria y por metro de ancho de frente de ola de cada punto.

PUNTO	Años	Energía [J/m]	Total horas de datos [h]	Energía media horaria [J/mh]	Potencia media horaria [W/m]
WANA_T_1042068	20	5,1730E+13	153143	3,3779E+08	93.830,240
WANA_T_1042072	20	5,5619E+13	153143	3,6318E+08	100.884,286
WANA_T_1043070	20	4,3813E+13	153143	2,8609E+08	79.470,023
WANA_T_1043071	20	3,7960E+13	153143	2,4787E+08	68.853,584
WANA_T_1043073	20	5,2294E+13	153143	3,4147E+08	94.853,249
WANA_T_1043074	20	5,8286E+13	153143	3,8060E+08	105.721,813
WANA_T_1044068	20	4,0308E+13	153143	2,6320E+08	73.112,494
WANA_T_1044069	20	3,6186E+13	153143	2,3629E+08	65.635,822
WANA_T_1044074	20	5,4150E+13	153143	3,5359E+08	98.219,747
WANA_T_1045074	20	4,9969E+13	153143	3,2629E+08	90.636,058
WANA_T_1046074	20	4,5571E+13	153143	2,9757E+08	82.658,764
WANA_T_1047075	20	4,9758E+13	153143	3,2491E+08	90.253,336
WANA_T_1048076	20	5,3465E+13	153143	3,4912E+08	96.977,262
WANA_T_1049076	20	5,1422E+13	153143	3,3578E+08	93.271,576
WANA_T_1050076	20	4,9843E+13	153143	3,2547E+08	90.407,513
WANA_T_1051075	20	2,3048E+13	153143	1,5050E+08	41.805,517
WANA_T_1052075	20	2,8720E+13	153143	1,8754E+08	52.093,650
WANA_T_1053075	20	3,1438E+13	153143	2,0529E+08	57.023,682
WANA_T_1054075	20	3,2724E+13	153143	2,1368E+08	59.356,288
WANA_T_1055075	20	3,3620E+13	153143	2,1953E+08	60.981,494
WANA_T_3002002	10	2,1369E+13	75548	2,8285E+08	78.570,357
WANA_T_3007036	10	2,5372E+13	75548	3,3584E+08	93.288,741
WANA_T_3027034	10	1,5445E+13	75548	2,0444E+08	56.788,767
WANA_T_3080042	10	1,5349E+13	75548	2,0317E+08	56.435,791

Tabla III.I

Fuente: [EP]

ELECCIÓN PUNTO MÁS RENTABLE

Como punto con mejores cualidades energéticas escogemos al punto WANA_T_1043074 y es con el que desarrollaremos todos los cálculos.

CAPITULO IV

ELABORACION DE DISEÑOS

El capítulo que comienza es la columna vertebral del propósito de este trabajo y es la creación de un diseño capaz de aprovechar la energía que posee el oleaje en su movimiento para transformarla en energía eléctrica. El desarrollo del mismo es un reflejo de la evolución y su porqué de los diferentes diseños que aquí se exponen, el cuál se intentará hacer de una manera lo más gráfica para poder visualizar los diseños desde varios puntos de vista y así conseguir transmitir en papel lo que en el ordenador usando el programa de diseño se ve con facilidad, es decir empleando gran cantidad de material fotográfico además de los planos de los diseños. La estructura como se dijo en capítulos anteriores es flotante y está anclada al fondo marino mediante cables y bloques de hormigón.

HIPÓTESIS PREVIAS

Es conveniente empezar recordando que el dispositivo se va a situar en el Océano Atlántico, a unos 10 km de la costa por lo que estará situado en la trayectoria de grandes olas, que por otra parte son las más energéticas y que serían las mejores para su aprovechamiento, tormentas considerables y aguas peligrosas en gran parte del año. Por estos motivos se parte de unas hipótesis previas y necesarias para garantizar: la estabilidad, flotabilidad y orientación mecánica del mismo sin necesidad de un aporte de energía extra al diseño para realizar estas tareas.

La primera hipótesis consiste en garantizar la estabilidad y para ello es necesario reducir el impacto y el arrastre que la ola produce en el dispositivo para que éste se mantenga en su posición de trabajo sin grandes oscilaciones que puedan hacer que se escorde el diseño.

La segunda hipótesis consiste en garantizar la flotabilidad y para ello se construirá un casco que permita tener aire en su interior de un determinado espesor y con estructura interna en el caso de necesitarla para que el dispositivo flote en cualquier condición meteorológica por muy adversa que ésta sea.

La tercera hipótesis consiste en conseguir que el dispositivo pueda girar automáticamente sin aporte ninguno de energía y orientarse perpendicular a la dirección del frente de olas para aprovechar al máximo la energía del mismo.

La cuarta hipótesis consiste en mantener el aparato hundido previa y parcialmente a una cota tal que le permita flotar y que además al estar sujeto por las cadenas a los bloques de hormigón el aparato quiera ascender y no pueda creándose así un estado tensional que le impida el movimiento de cabeceo al paso de la ola, es decir, que no oscile y poder canalizar el agua hacia el tubo.

Estas hipótesis son las que además de cumplirlas nos servirán de método para descartar los diseños hasta alcanzar el que mejor las cumpla y por tanto el que más se ajuste al objetivo del trabajo.

BASES DE CÁLCULO

Los principios en los que se basa este diseño son: el principio de Bernoulli, empleando la ecuación de la energía y el de conservación de la masa. Son los que explican cómo al pasar un fluido a través de un conducto cerrado e ir reduciendo la sección del mismo para que se conserve la cantidad de masa necesariamente el fluido tiene que aumentar su velocidad (Figura IV.1). Es éste aumento de la velocidad el que se aprovecha para mover las palas de la turbina la cual está situada en el interior del conducto. Para realizar estos cálculos se ha empleado el programa de dinámica computacional de fluidos Fluent, siendo éste un paquete del programa Ansys.

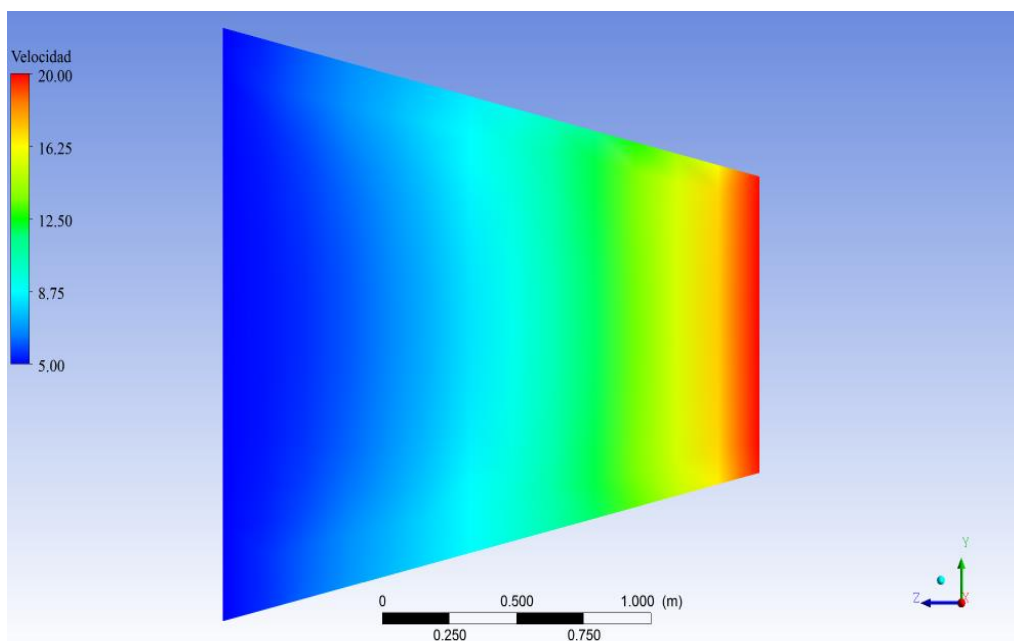


Figura IV.1

Fuente: [EP]

La mejor forma de calcular los diseños ha sido descomponer en dos modelos diferentes la forma de evaluar su principal componente hidráulica, siendo éstos la realización de un túnel de agua y la posterior simulación del oleaje en los diseños más refinados, para la elección de uno en concreto, siendo éste el que cumple de manera más óptima todas las hipótesis planteadas anteriormente. Las ecuaciones que emplea el programa Ansys Fluent para el cálculo hidráulico, son principalmente la ecuación de la energía y la ecuación de la continuidad pero con la característica principal de poder calcular teniendo en cuenta la turbulencia del agua en su movimiento, fundamental para este proyecto ya que el agua del océano no se comporta en régimen laminar.

TIPOS DE DISEÑOS

El diseño inicial con el que se empezó este trabajo estaba situado dentro de la pila de un puente en contacto con el agua en la zona costera y era similar a una boya que subiendo y bajando siguiendo al movimiento de la ola que circulaba por la pila a través de unas aberturas en la zona baja de la misma, movía unas cadenas que accionaban un generador y así producir electricidad. Al evolucionar las conversaciones con el tutor del trabajo se acordó que sería mejor centrar el desarrollo del trabajo en el diseño del dispositivo, sin diseñar la pila del puente y así fue como (Figura IV.2) surgió la primera idea de la forma del dispositivo.

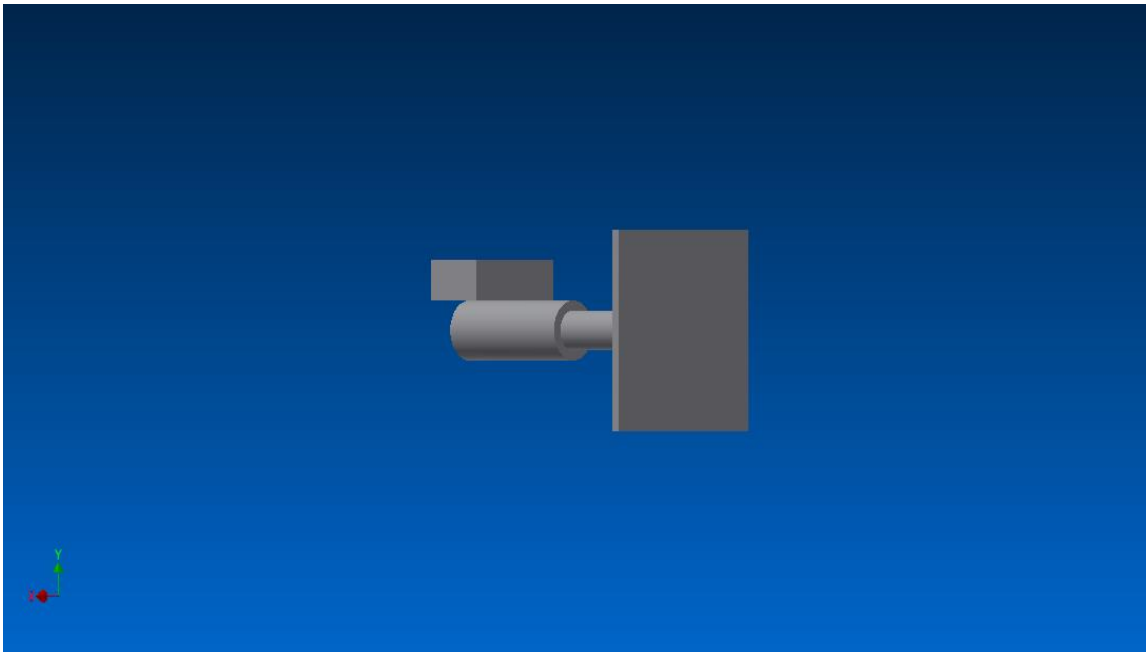


Figura IV.2

Fuente: [EP]

Este diseño consistía en una placa que al paso de la ola accionaba un cilindro hidráulico, con su depósito para el movimiento del aceite, que moviendo una turbina conectada mecánicamente a un generador producía electricidad. Pero este diseño se desechó rápidamente debido principalmente a que se intuye que al pasar la ola el cilindro vuelve a su posición inicial y al estar la turbina dentro del cilindro las pérdidas por accionamiento de la turbina al no disponer de la fuerza de la ola harían que el dispositivo tras un número determinado de accionamientos no recuperase su posición inicial y por tanto dejaría de funcionar correctamente al no disponer de todo el recorrido del pistón. Por este motivo y porque se observó que el diseño fundamentado en el principio de Bernoulli apenas tiene pérdidas se decidió centrar el desarrollo del trabajo en este último tipo de dispositivo.

Como se dijo anteriormente la mejor forma de poder visualizar el dispositivo que materializa el diseño es de forma gráfica por lo tanto se pasa a presentar cada uno de los modelos que han ido evolucionando a lo largo del desarrollo del diseño. Para referirnos con facilidad a los diferentes modelos se les identificara mediante las siglas, modelo más un número: M1, M2, etcétera.

En el diseño M1 la abertura para captar las olas es de 10 metros de diámetro a diferencia de los 5 metros que se dijo anteriormente que se iba a emplear, debido a que al tratarse del primer diseño se le dio más importancia a la estabilidad y flotabilidad que a la optimización del diseño.



Figura IV.MI-1

Fuente: [EP]

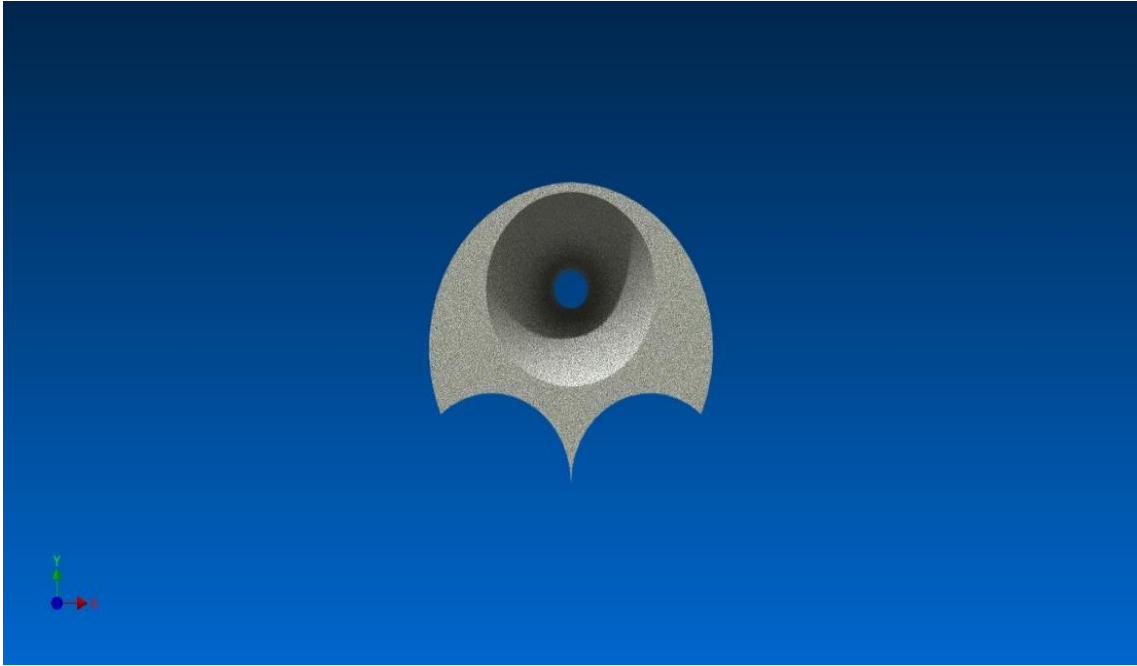


Figura IV.MI-2

Fuente: [EP]



Figura IV.MI-3

Fuente: [EP]



Figura IV.MI-4

Fuente: [EP]

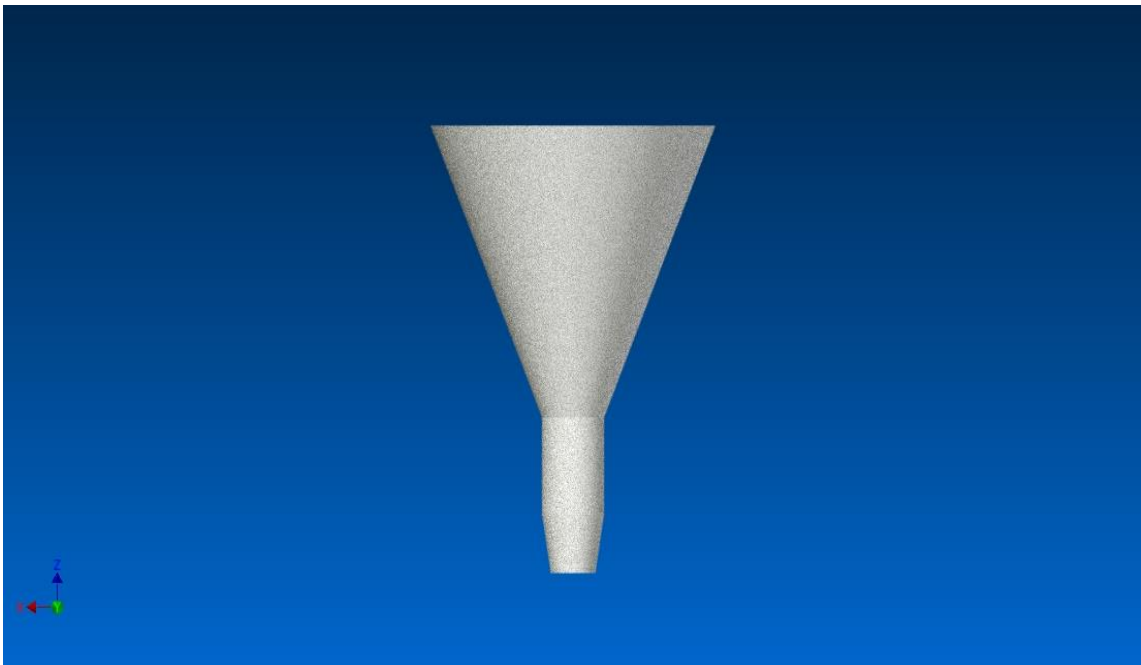


Figura IV.MI-5

Fuente: [EP]

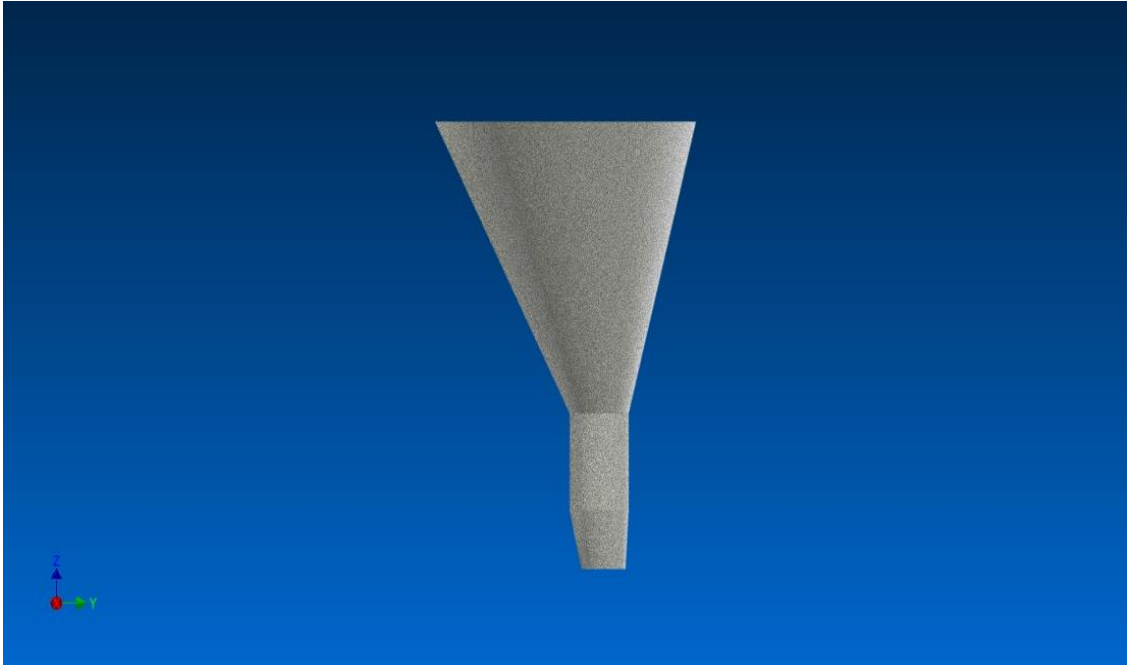


Figura IV.MI-6

Fuente: [EP]

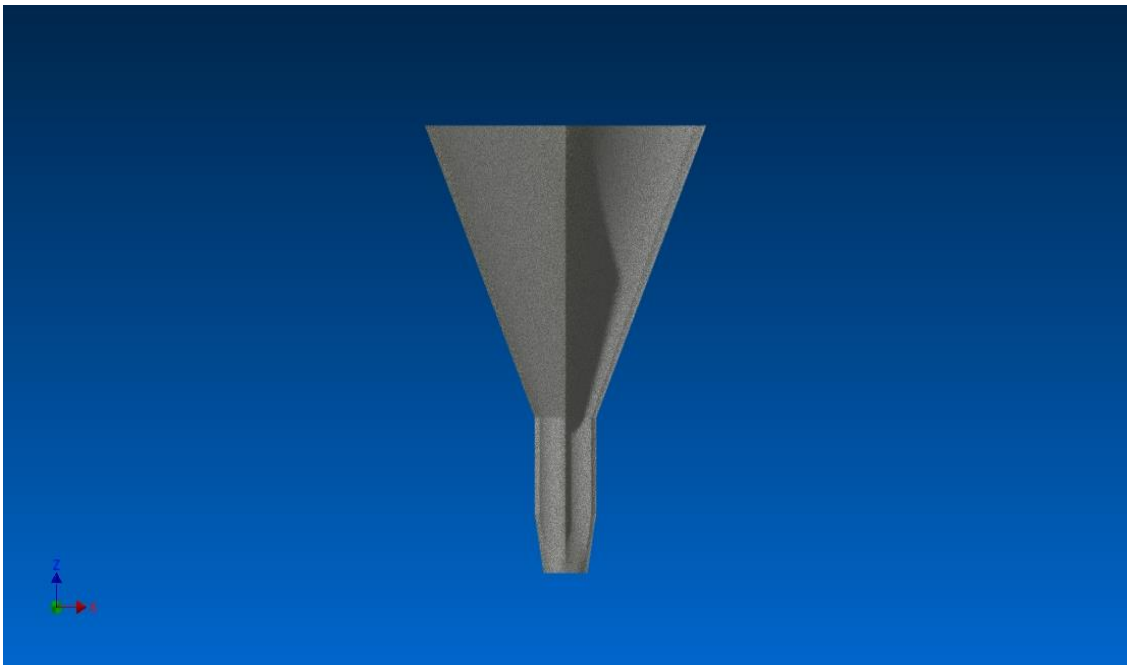


Figura IV.MI-7

Fuente: [EP]

En estas figuras anteriores vemos como el diseño M1 posee una forma de "v" ascendente hacia el estrechamiento del tubo en su parte inferior con la intención de canalizar el agua de manera que ésta al pasar por el diseño ayude a salir al agua de dentro del tubo, principio que se repetirá en todos los diseños, además de ser similar a la quilla de los barcos, para darle estabilidad al ser un peso situado en la parte baja y central del diseño. La forma exterior de circunferencia se ha realizado así para que los pontones laterales posean unas dimensiones tales que den al diseño de estabilidad frente a oscilaciones laterales.

Un problema que se puede ver en este diseño es que la quilla por la zona delantera es mucho mayor que en su parte trasera, esto provoca que una ola que alcanzase al diseño con una dirección diferente a la de reposo, dirección paralela al eje z, el diseño tendería a girarse y la entrada del tubo no se situaría paralela a la dirección de esa ola, le daría la espalda al oleaje y no funcionaría. Esto es algo que se ha conseguido solucionar en diseños posteriores más depurados.

En la siguiente figura (Figura IV.M1-8) se observa la forma que posee el tubo de este diseño para canalizar y aumentar de velocidad el agua que circula por el mismo, la turbina se situaría en la zona más estrecha para aprovechar este aumento de la velocidad. La parte final del tubo se ensancha para reducir la velocidad del agua ya que sólo interesa que se acelere en la zona de la turbina.

En el anejo PLANOS se muestra más vistas del diseño acotando sus dimensiones más relevantes. Proceso que se repetirá para todos los diseños haciendo especial hincapié en el M9.

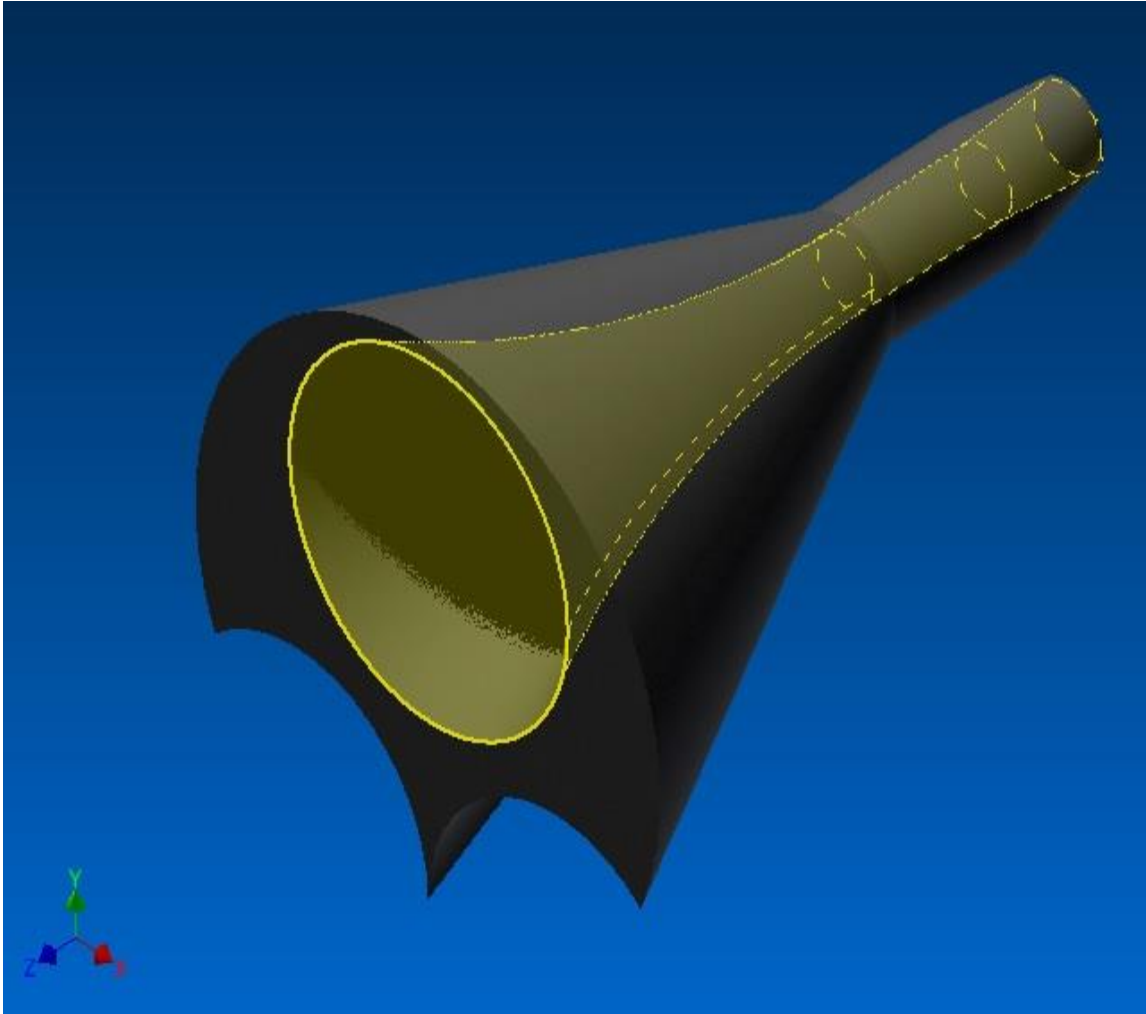


Figura IV.MI-8

Fuente: [EP]

En las siguientes figuras se ha representado, en el túnel de agua que antes se avanzaba, por una parte el diseño con una serie de líneas de corriente coloreadas según su velocidad, Streamline en Fluent, las cuales nos muestran la trayectoria que seguiría el agua al chocar con el diseño en cuestión. Esto nos permite ver las zonas en la que se producen recirculaciones de del agua, las cuales es necesario evitar para optimizar el diseño también como las líneas que entran dentro del tubo se aceleran y como las líneas que se adaptan a la forma de "v" ayudan a las que salen del tubo a continuar su trayectoria sin que se produzcan movimientos bruscos en su circulación. (Figura IV.MI-9 a Figura IV.MI-12).

En las figuras: Figura IV.MI-13 y Figura IV.MI-14 está representado el plano YZ que pasa por la zona central del diseño con la velocidad de las partículas en esa zona para observar cómo se acelera el flujo de agua tanto por la zona exterior del diseño como por la interior.

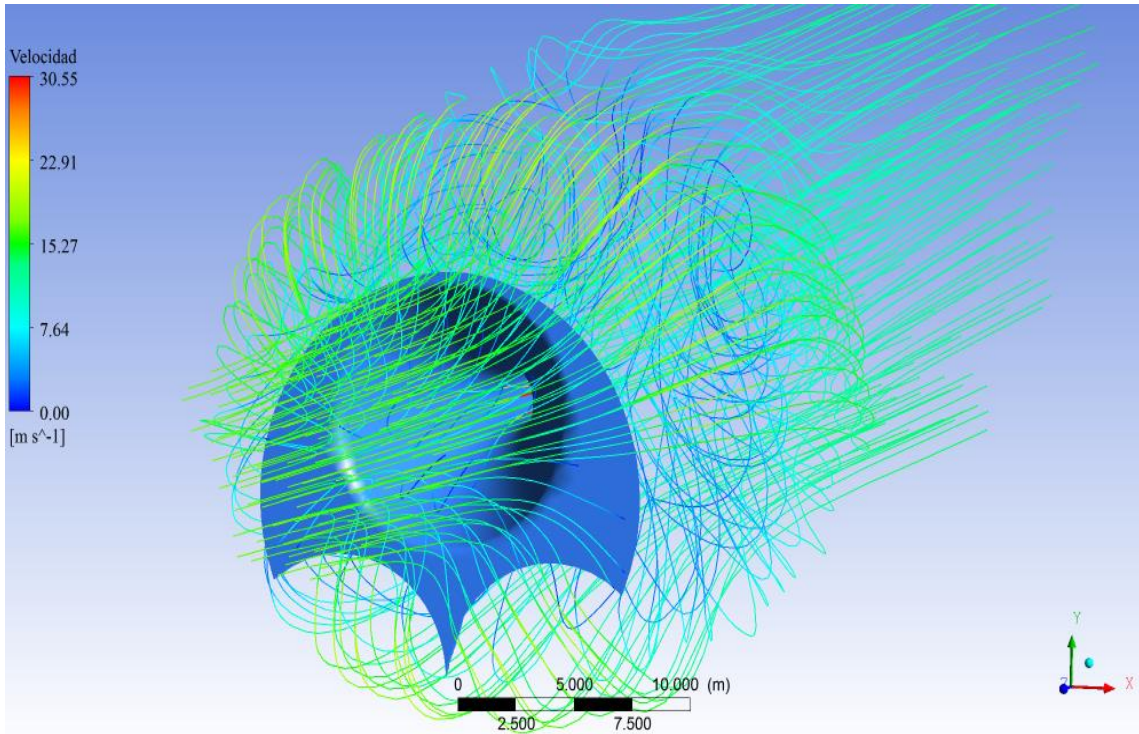


Figura IV.MI-9

Fuente: [EP]

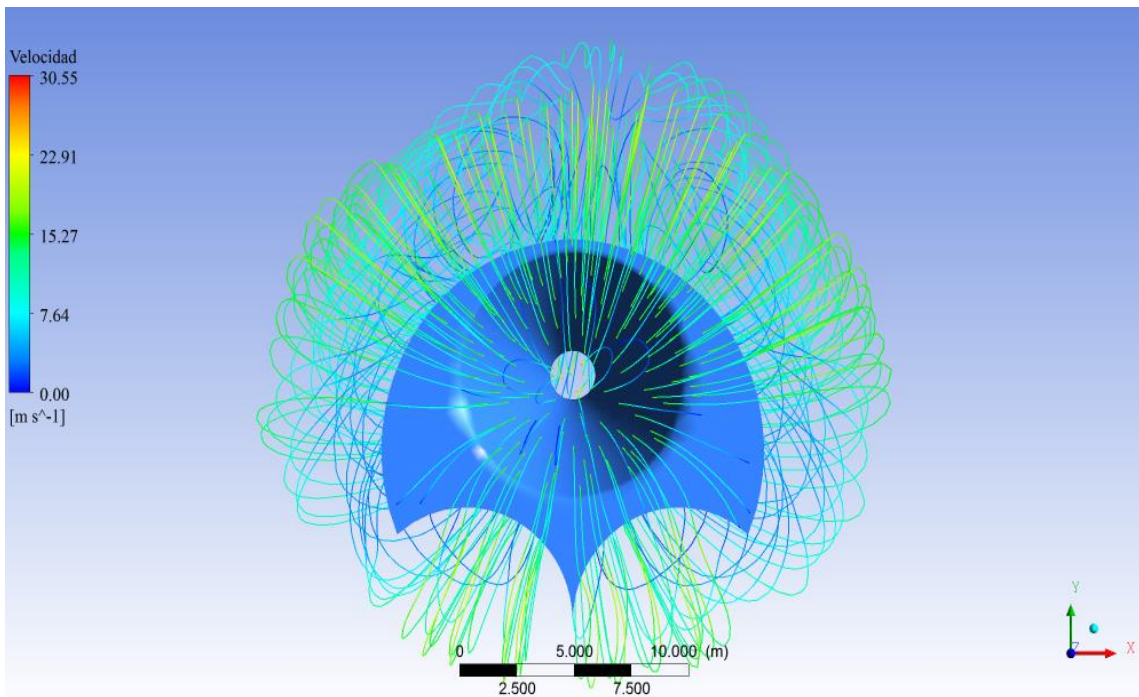


Figura IV.MI-10

Fuente: [EP]

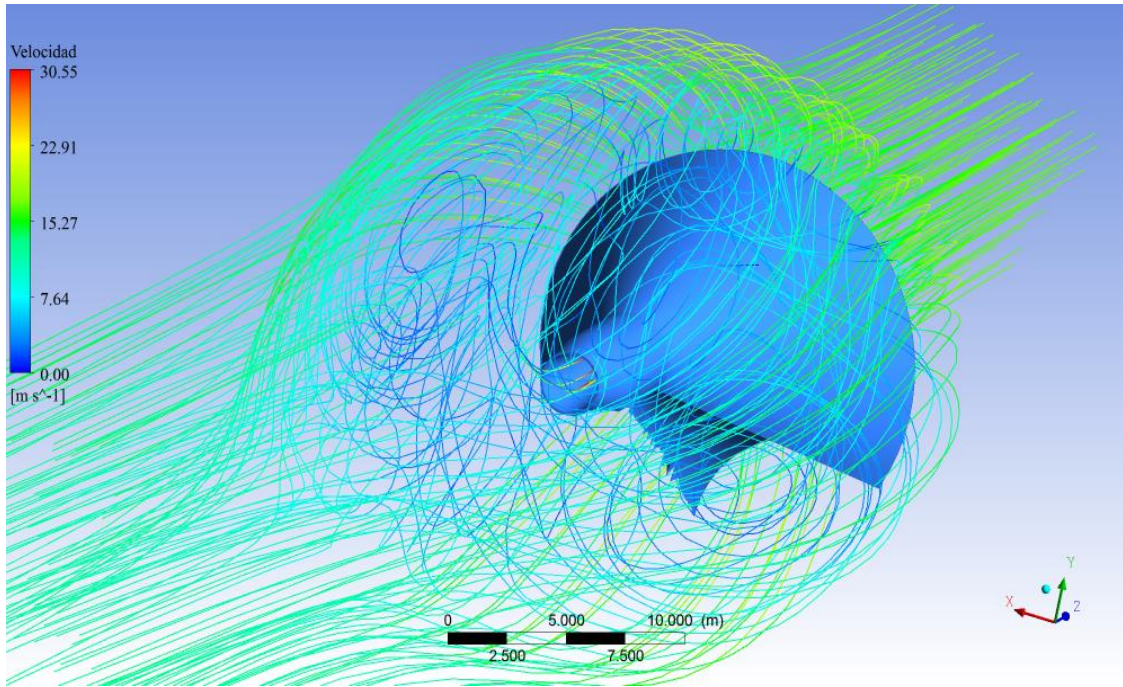


Figura IV.MI-II

Fuente: [EP]

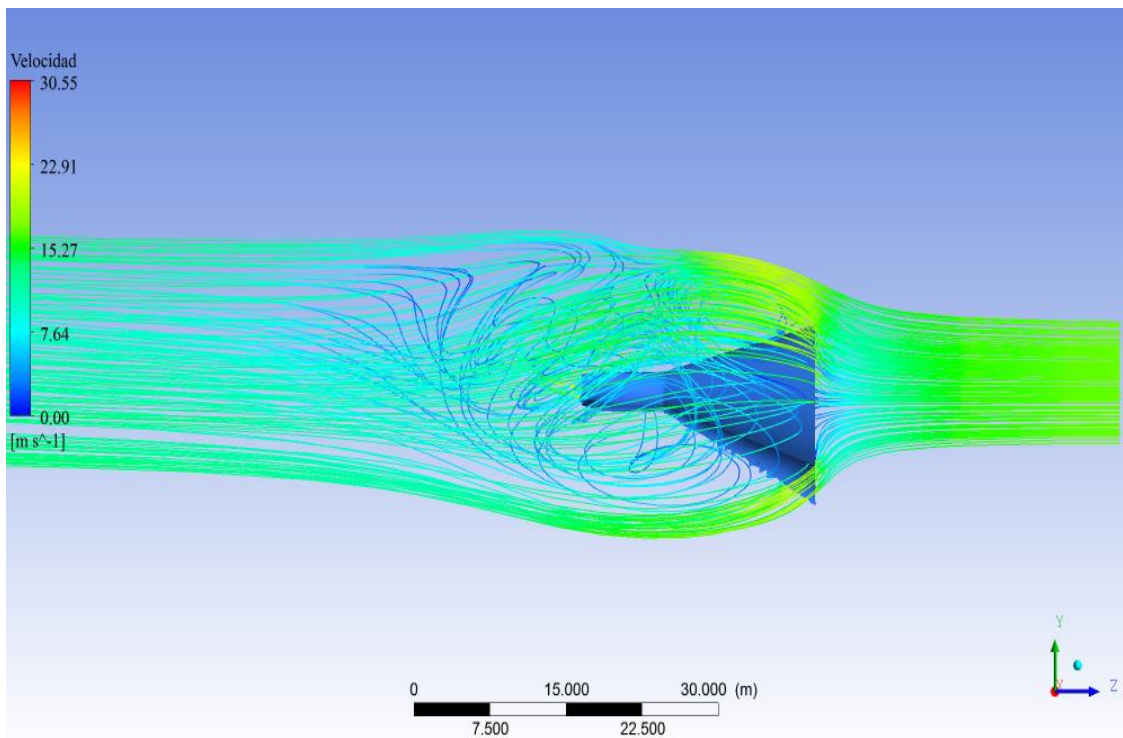


Figura IV.MI-12

Fuente: [EP]

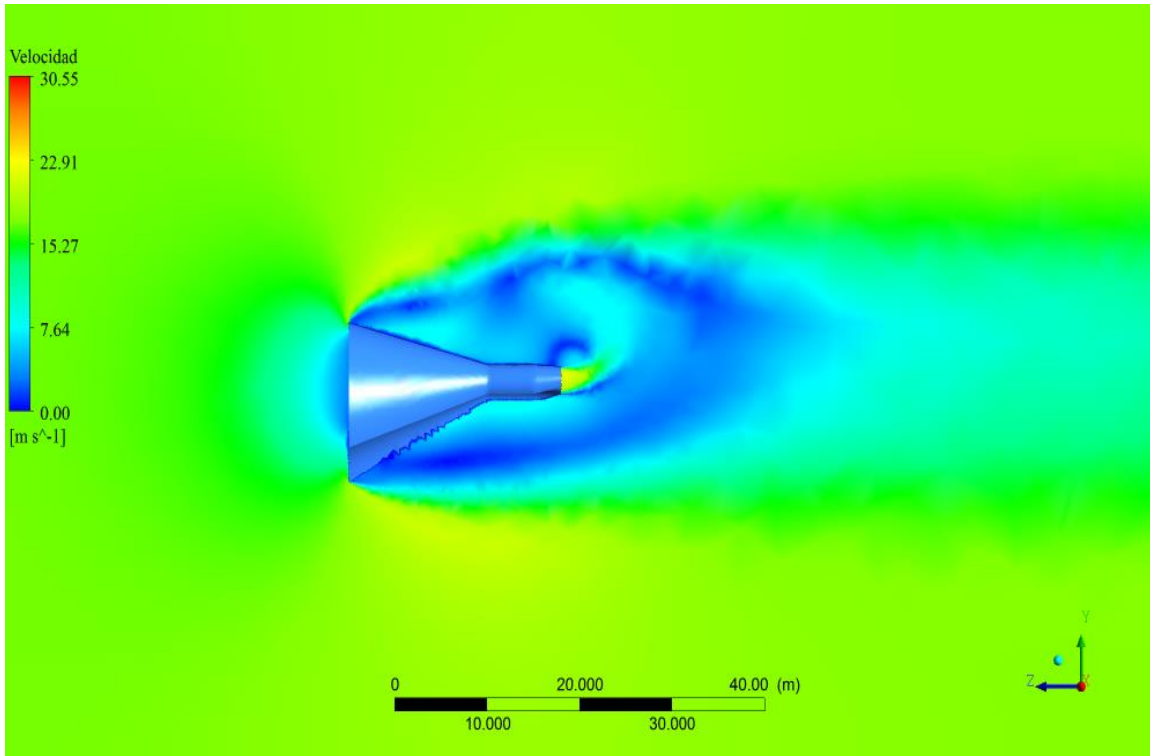


Figura IV.MI-13

Fuente: [EP]

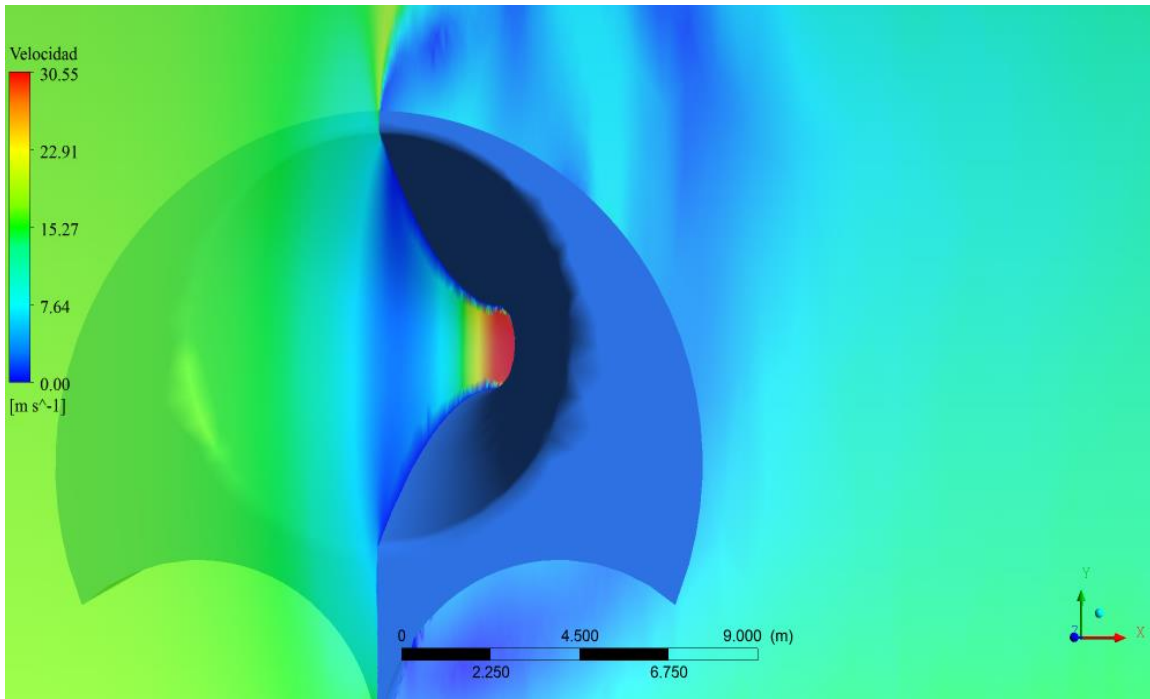


Figura IV.MI-14

Fuente: [EP]

En el diseño M2 la abertura para captar las olas continúa siendo de 10 metros de diámetro debido a que se continúa tratando de optimizar la estabilidad y flotabilidad. Aunque se observa que el tamaño de la quilla es menor en comparación con el diseño anterior y los pontones laterales son más anchos y alargados para conseguir más estabilidad lateral así como se ha hecho más ancha toda la parte central del diseño para ganar estabilidad y flotabilidad en esa zona a diferencia del diseño anterior que era más estrecho y por tanto menos estable. La forma exterior se ha diseñado con transiciones suaves de unas secciones a otras para minimizar el arrastre producido por la ola en su avance. Continúa la forma inferior de "v" para dar facilidad de paso al agua y que favorezca la salida del agua que circula por el interior del tubo. La parte de la entrada del diseño es por ahora una pared vertical ya que en este diseño se mejoró el contorno exterior del mismo.

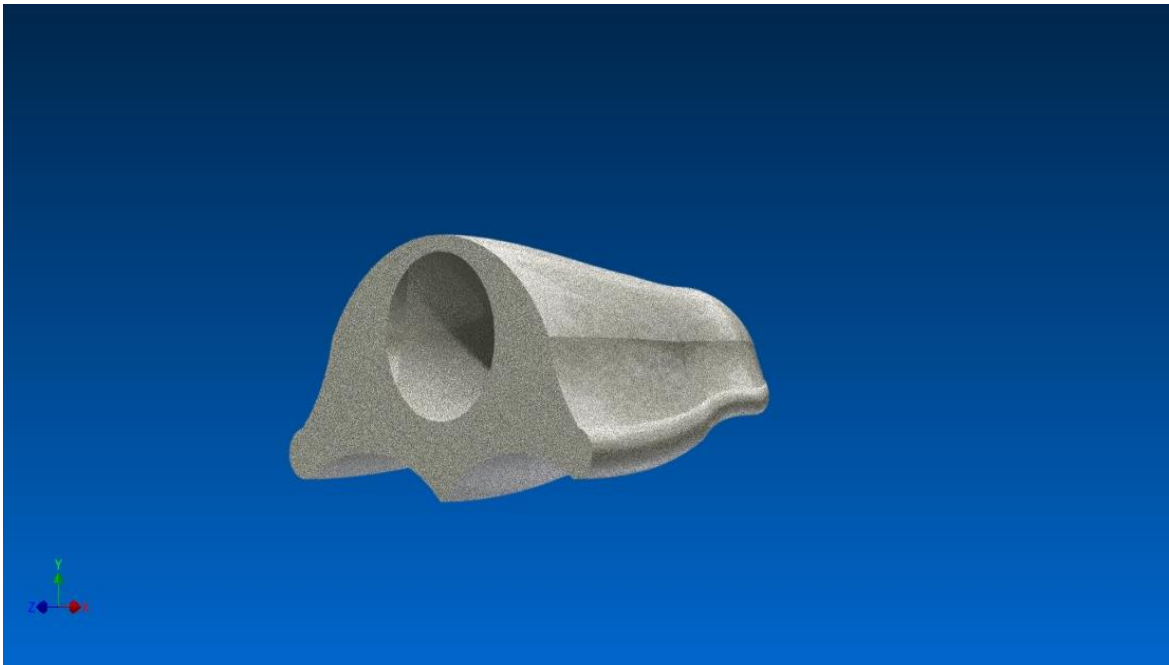


Figura IV.M2-1

Fuente: [EP]

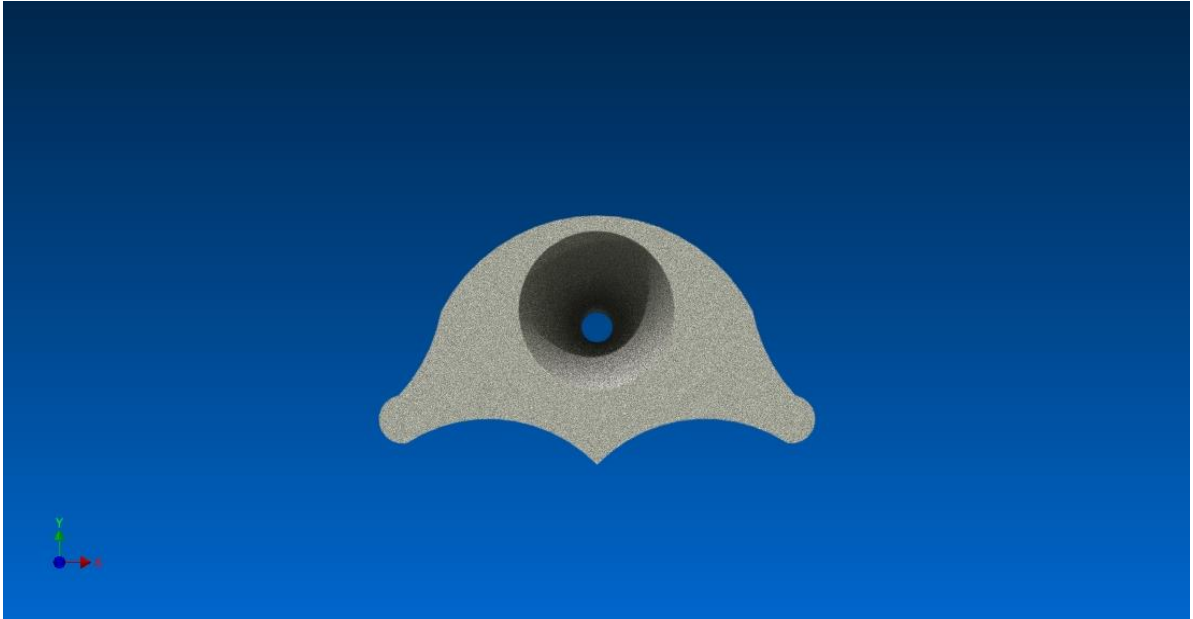


Figura IV.M2-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M2-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M2-4

Fuente: [EP]



Figura IV.M2-5

Fuente: [EP]

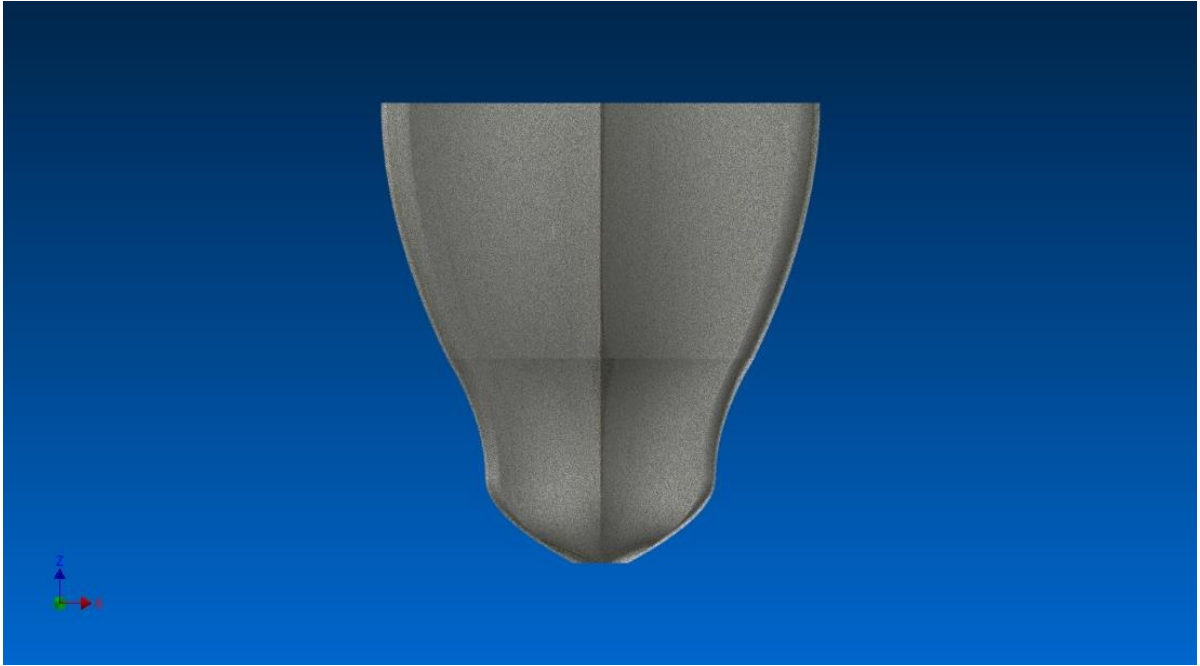


Figura IV.M2-6

Fuente: [EP]

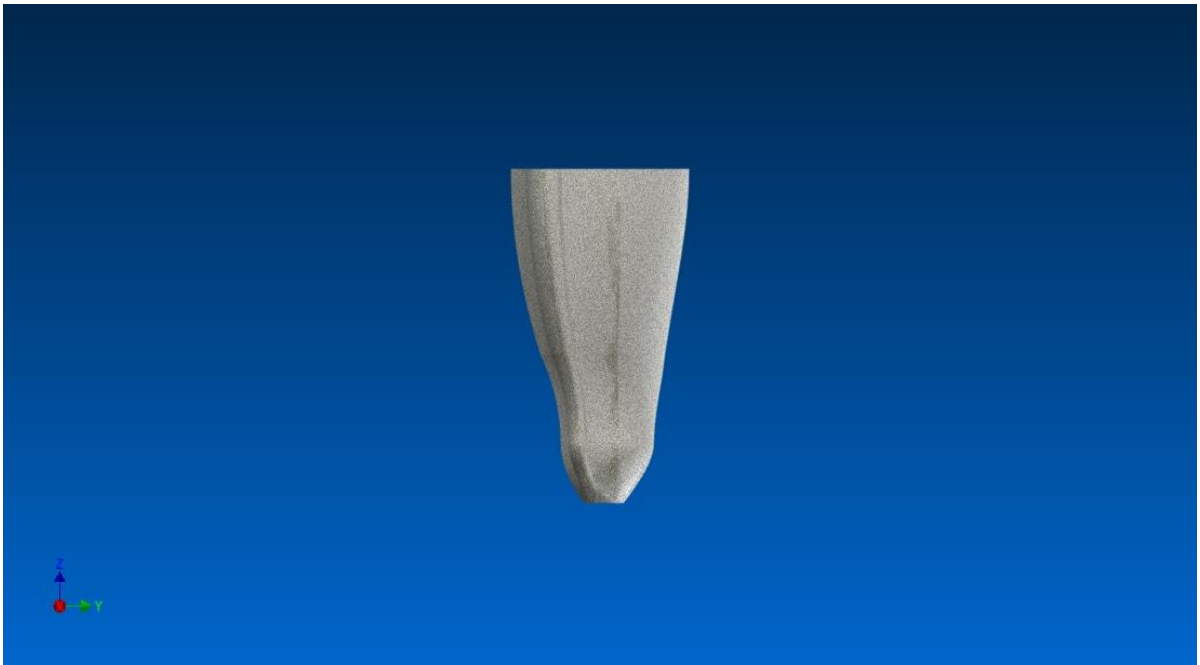


Figura IV.M2-7

Fuente: [EP]

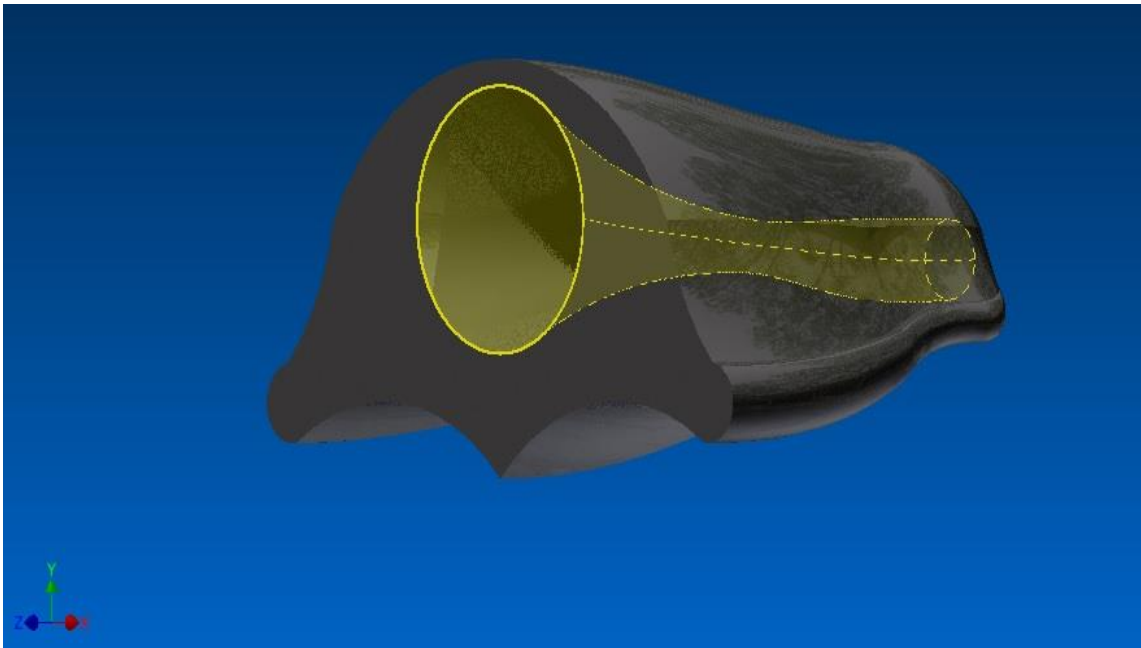


Figura IV.M2-8

Fuente: [EP]

En la figura (Figura IV.M2-8) se observa la forma que posee el tubo de este diseño para canalizar y aumentar de velocidad el agua que circula por el mismo, la turbina se situaría en la zona más estrecha para aprovechar este aumento de la velocidad al igual que antes pero ahora la parte central del mismo está más suavizada para que no aparezcan remolinos dentro del tubo en la zona de la turbina lo cual sería un grave fallo ya que podría facilitar la aparición de la cavitación aparte de crear unas presiones de succión en la zona donde las palas de la turbina y la chapa del tubo están más cerca y que puedan llegar a chocar ambas estructuras y comprometer la flotabilidad del diseño.

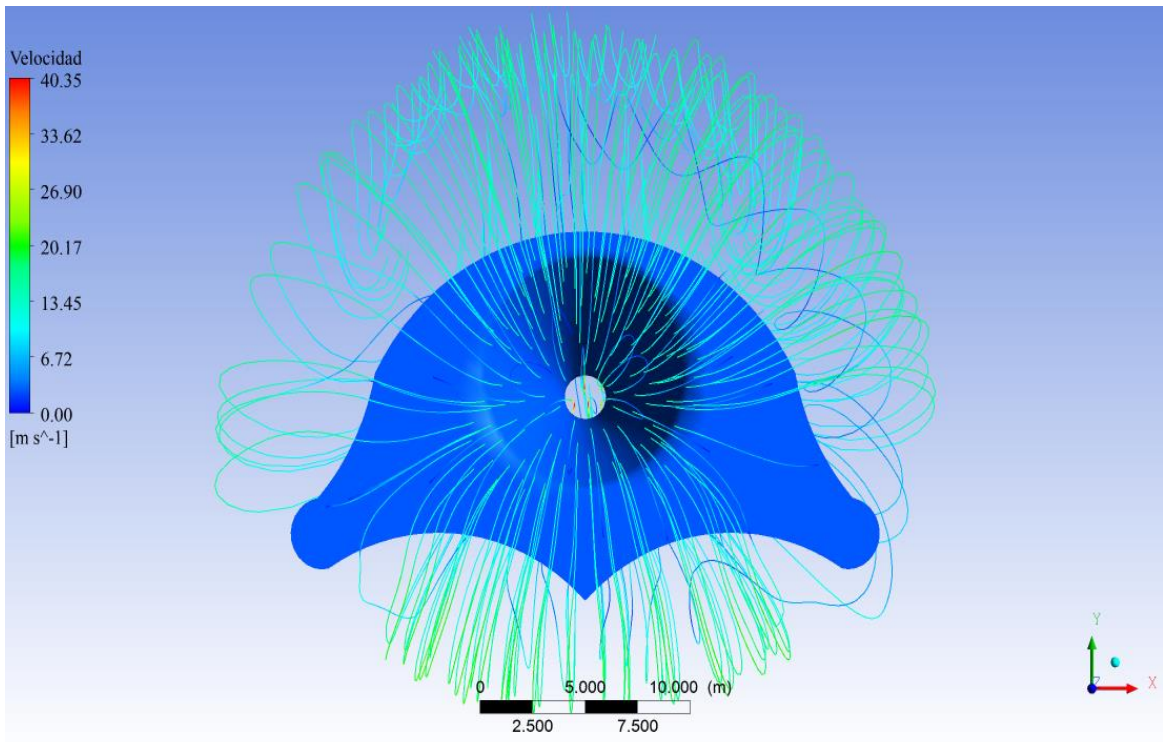


Figura IV.M2-9

Fuente: [EP]

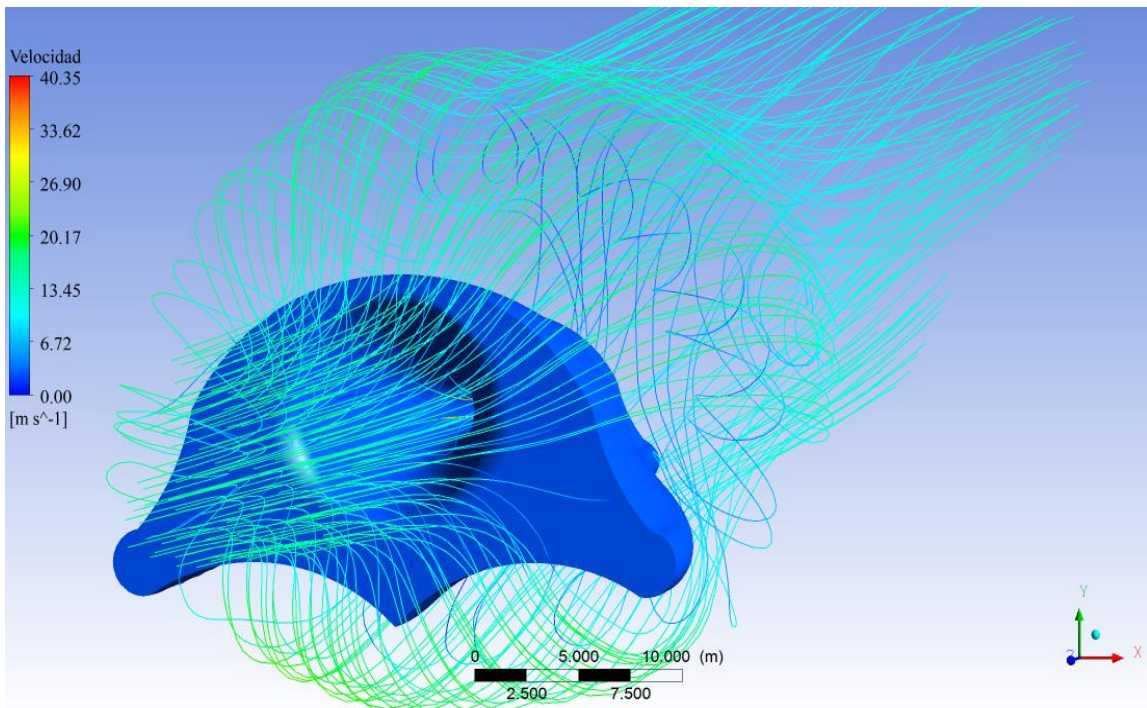


Figura IV.M2-10

Fuente: [EP]

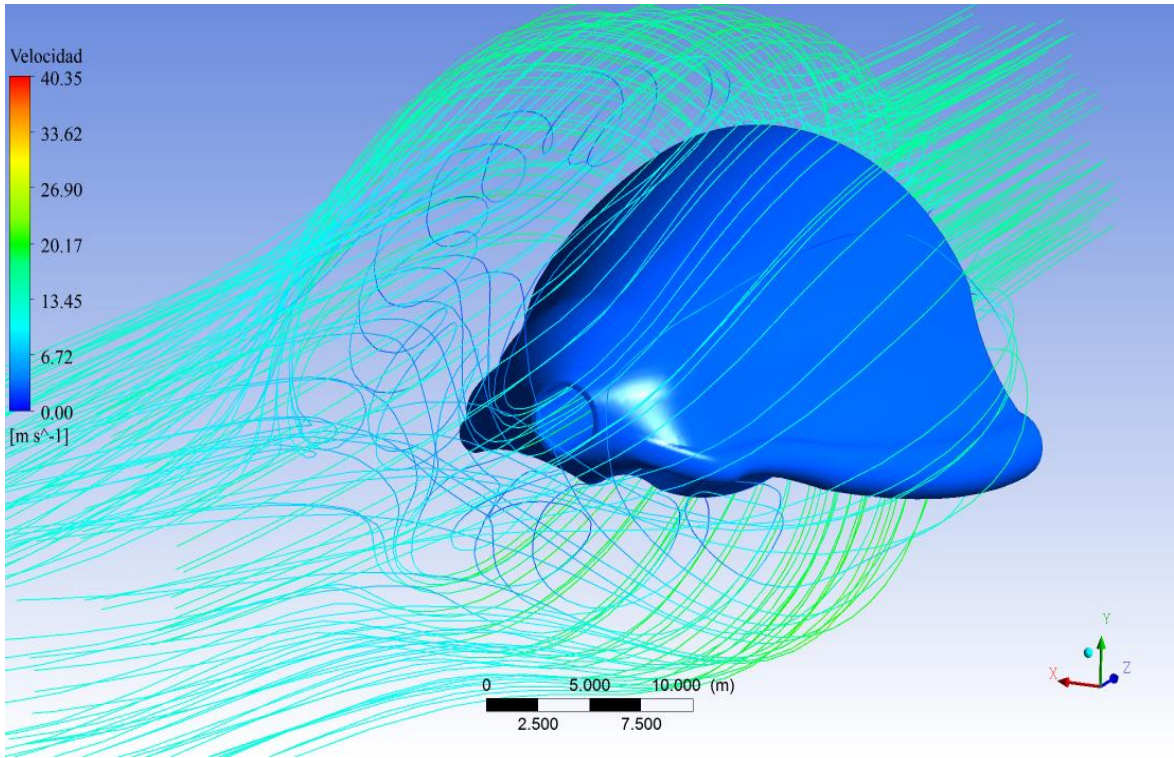


Figura IV.M2-II

Fuente: [EP]

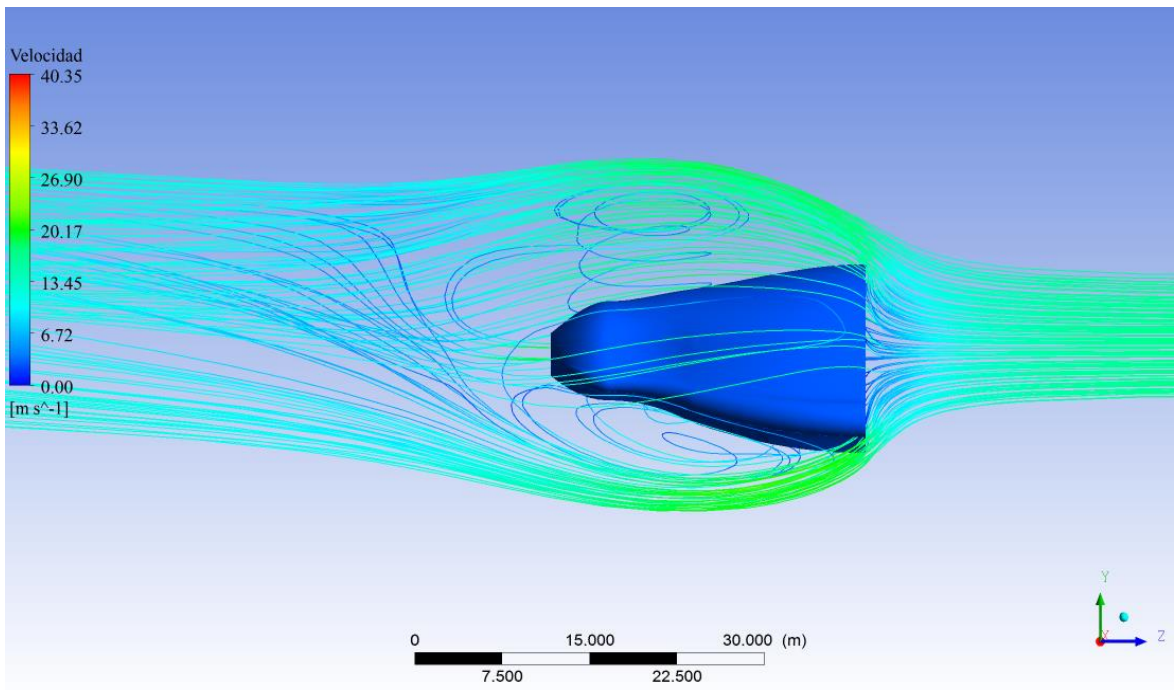


Figura IV.M2-I2

Fuente: [EP]

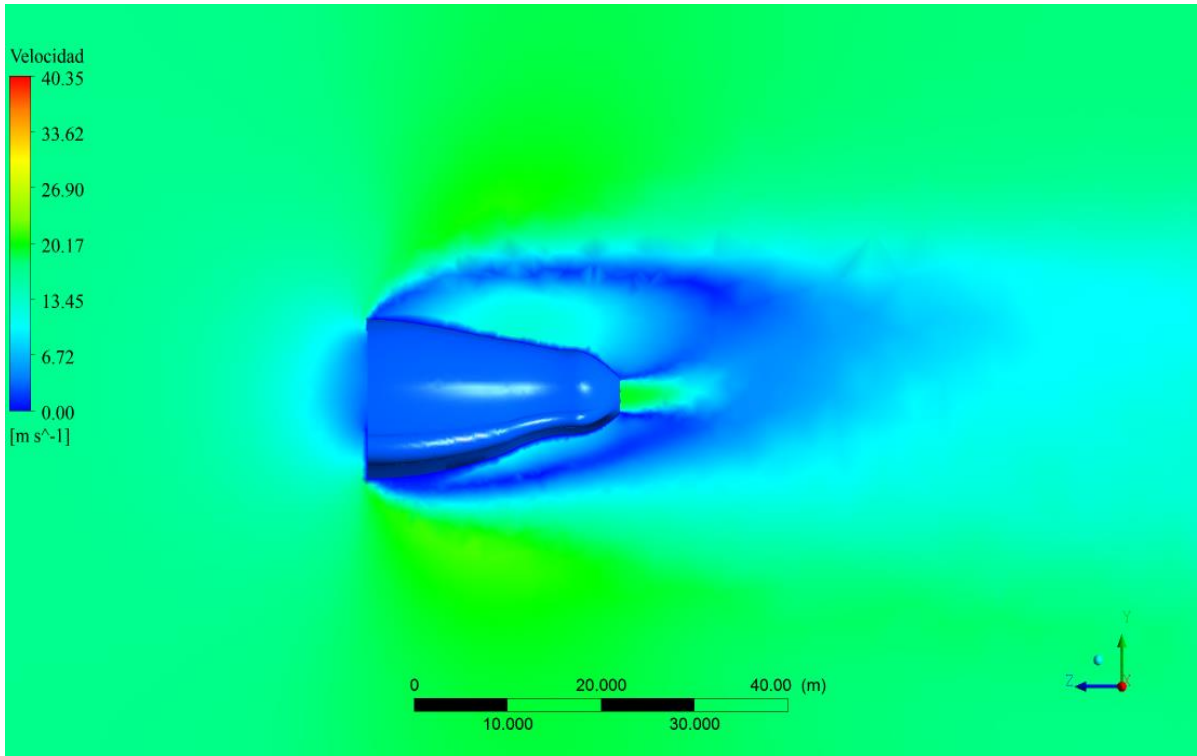


Figura IV.M2-13

Fuente: [EP]

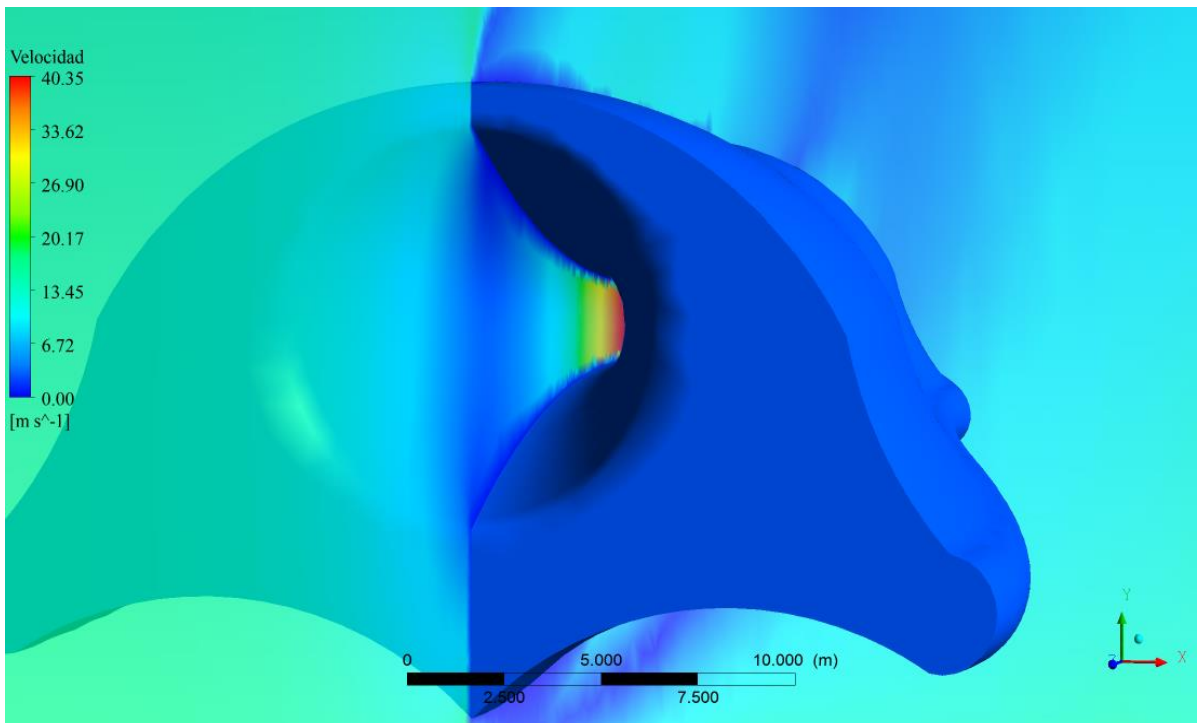


Figura IV.M2-14

Fuente: [EP]

Como se ve en las figuras (Figura IV.M2-9 a Figura IV.M2-14) las trayectorias de las líneas de corriente son más suaves que en el diseño anterior, esto supone una mejora del diseño.

En el diseño M3 la abertura para captar las olas continúa siendo de 10 metros de diámetro debido a que se continúa tratando de optimizar la estabilidad y flotabilidad pero deja de ser vertical para pasar a ser una superficie cóncava que recoge y canaliza mejor el agua hacia el interior del tubo.

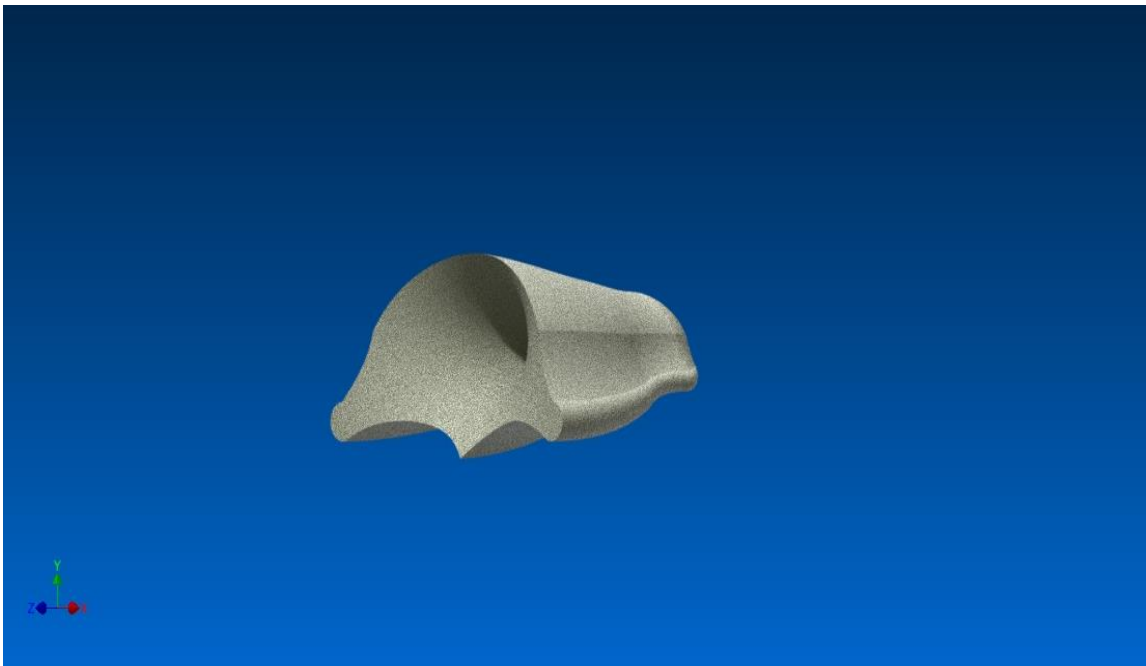


Figura IV.M3-1

Fuente: [EP]

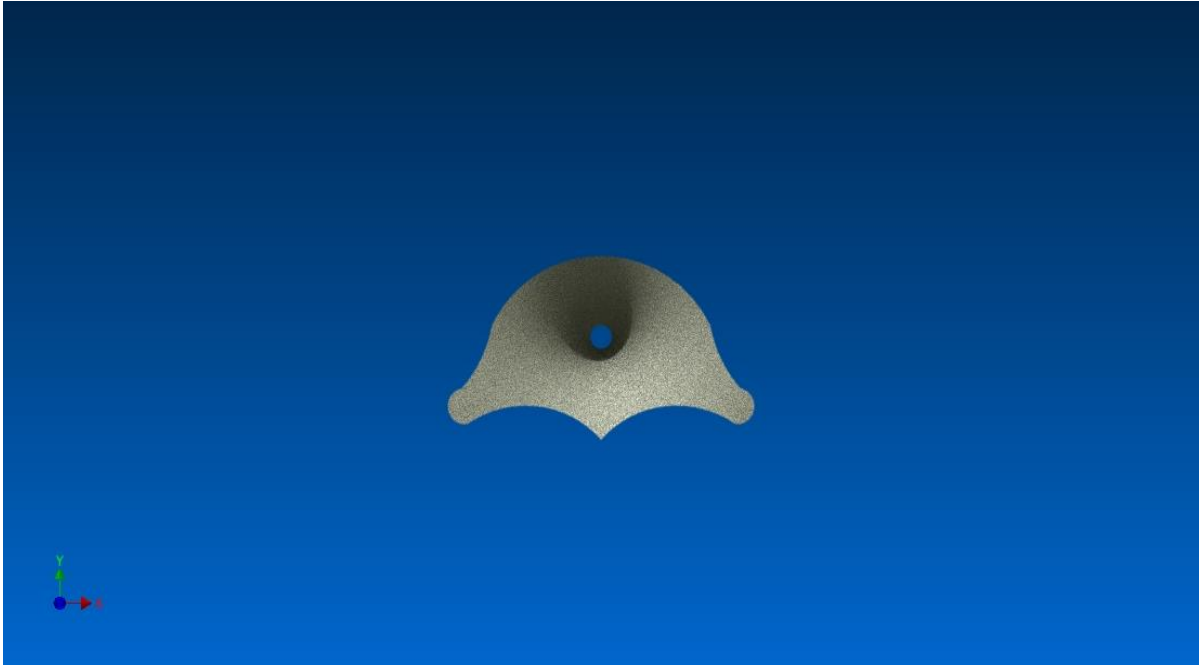


Figura IV.M3-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M3-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M3-4

Fuente: [EP]

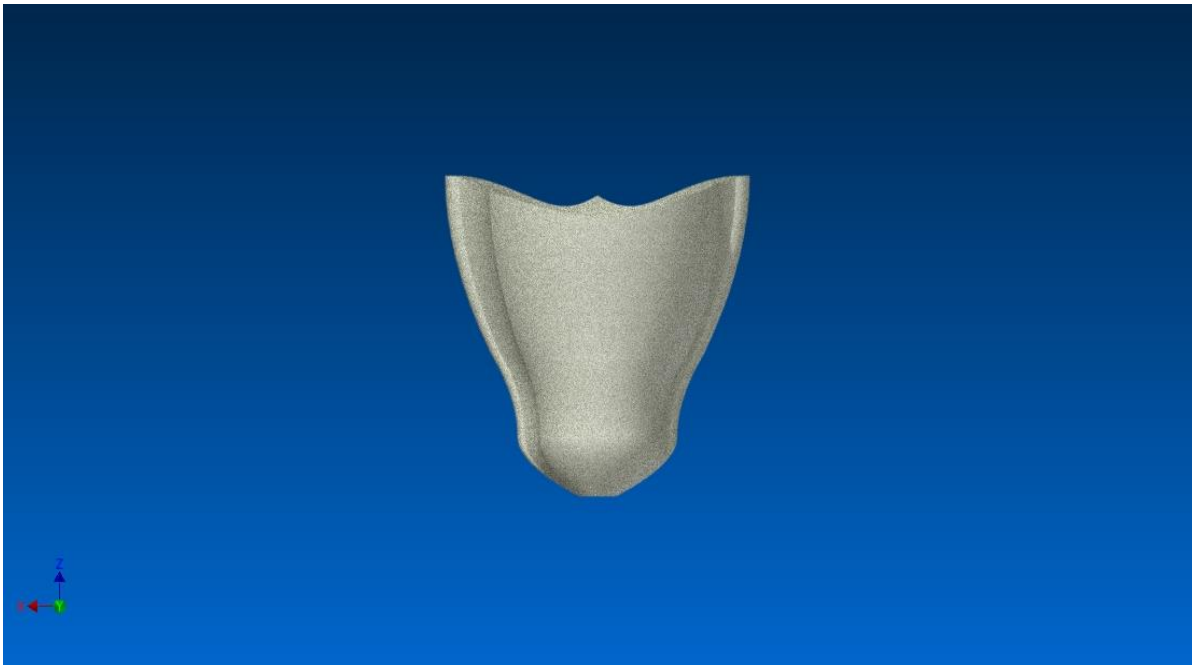


Figura IV.M3-5

Fuente: [EP]

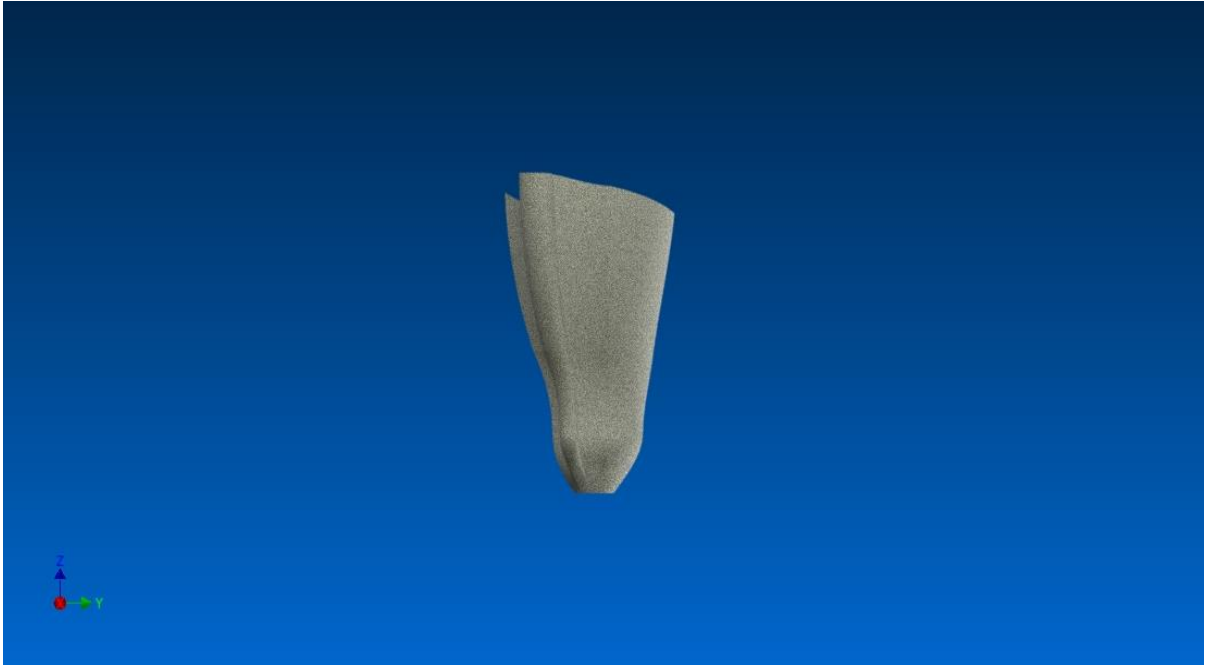


Figura IV.M3-6

Fuente: [EP]

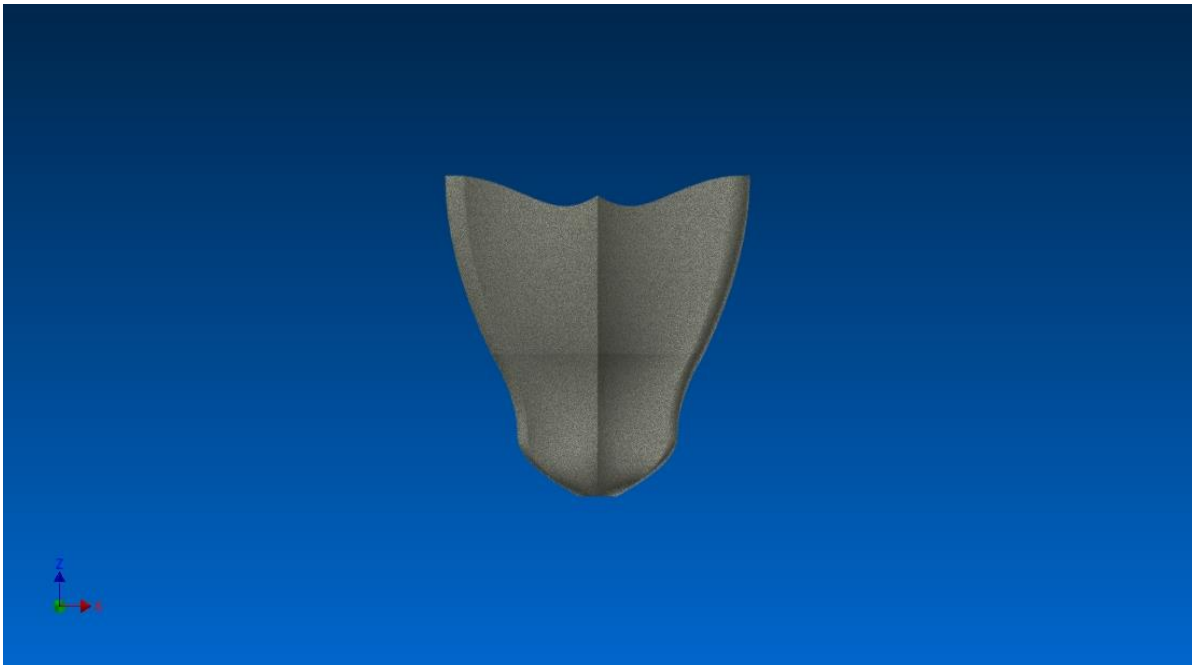


Figura IV.M3-7

Fuente: [EP]

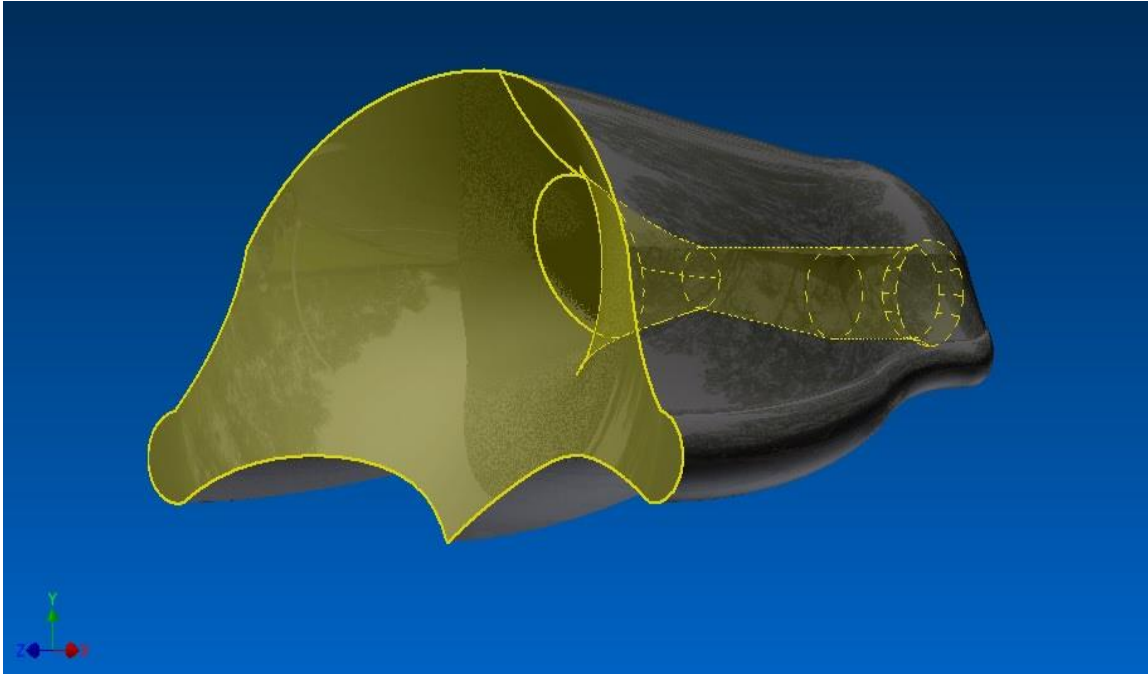


Figura IV.M3-8

Fuente: [EP]

En esta última figura observamos como la parte interior del tubo no cambia y si lo hace la superficie de entrada que pasa a canalizar de forma más suave y eficiente el agua ya que aumenta la velocidad en el interior del tubo como se ve en las figuras siguientes.

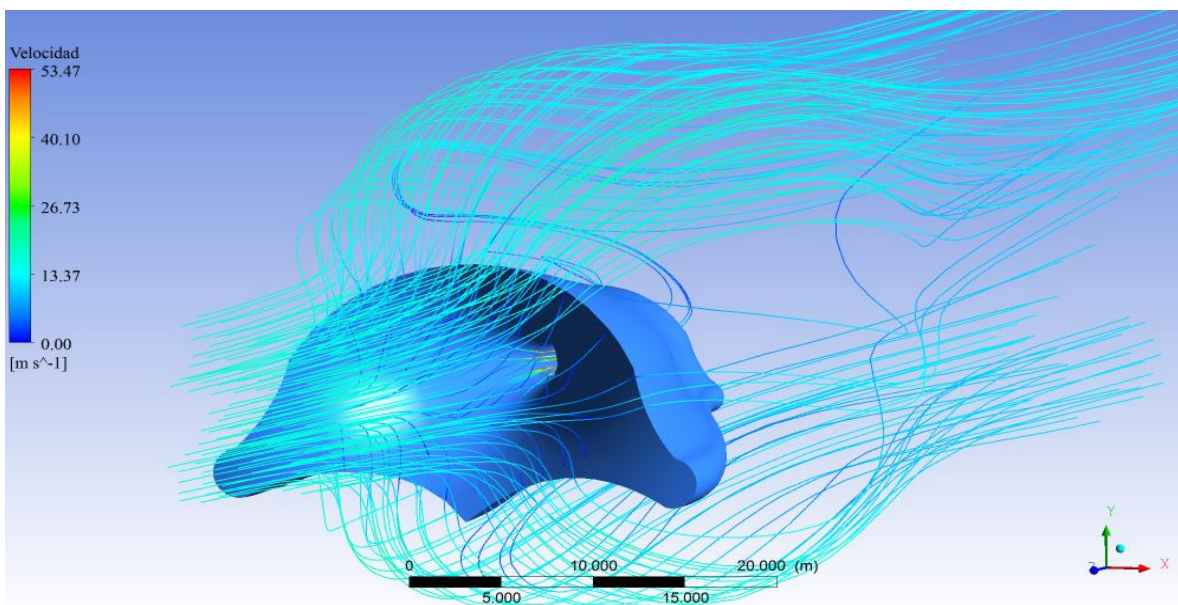


Figura IV.M3-9

Fuente: [EP]

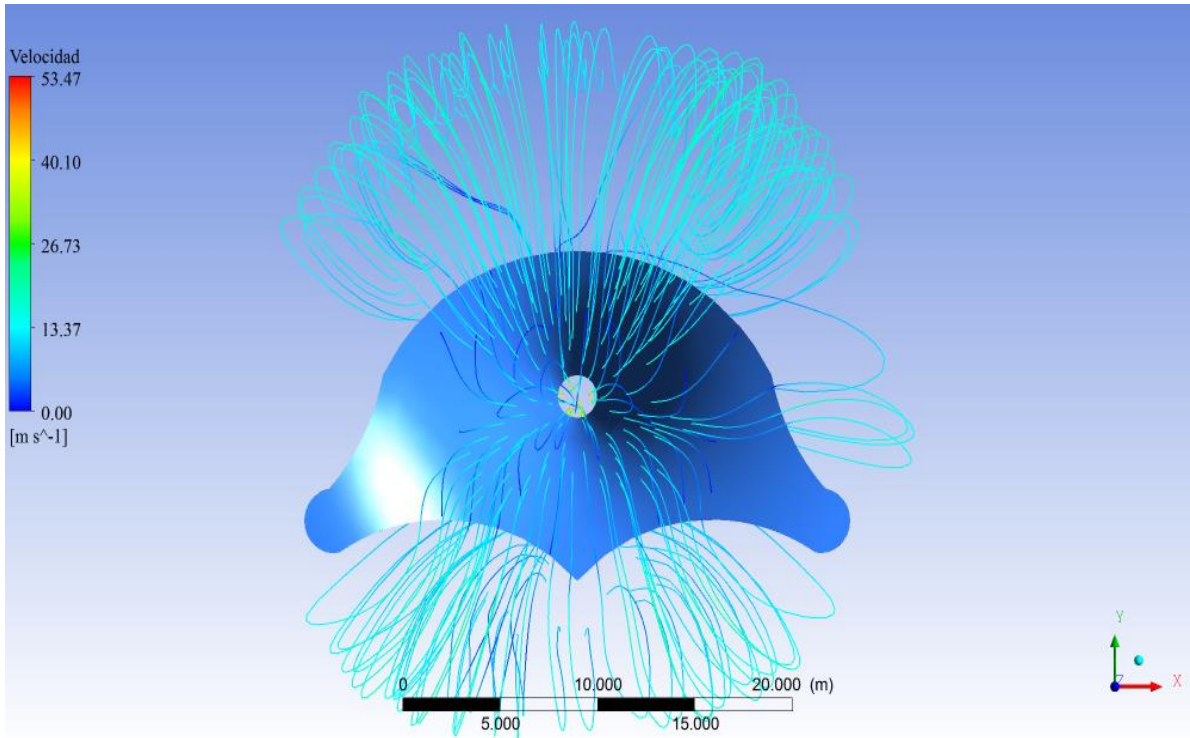


Figura IV.M3-10

Fuente: [EP]

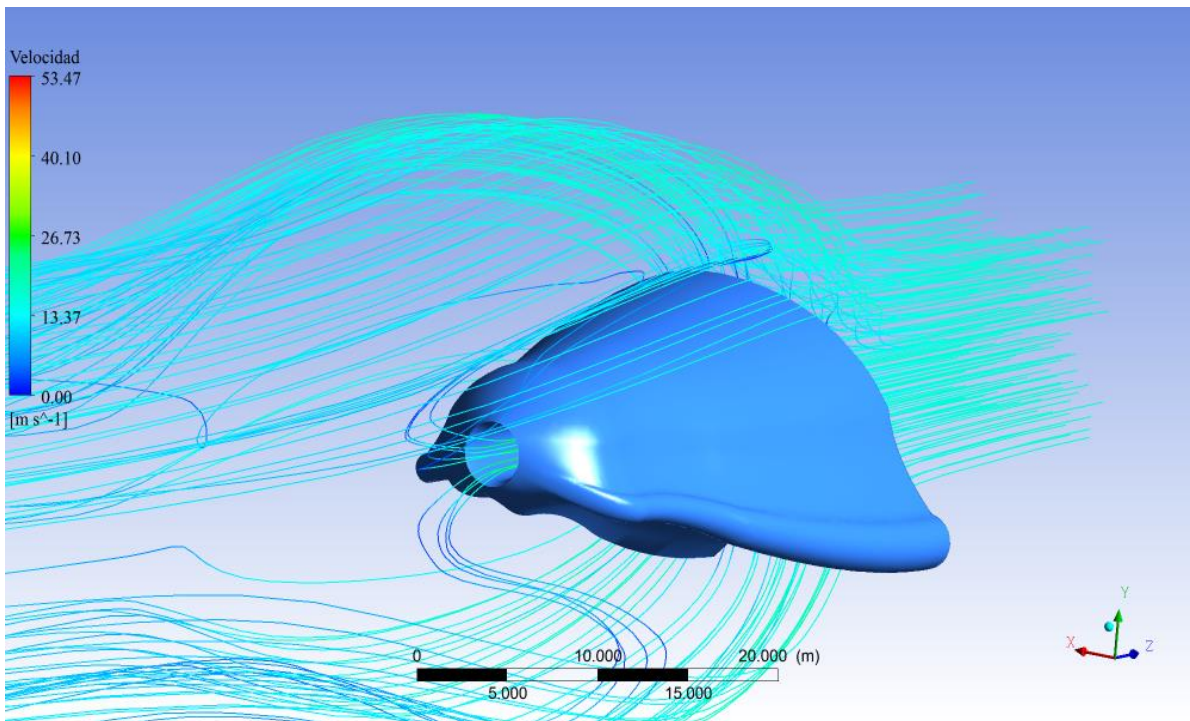


Figura IV.M3-11

Fuente: [EP]

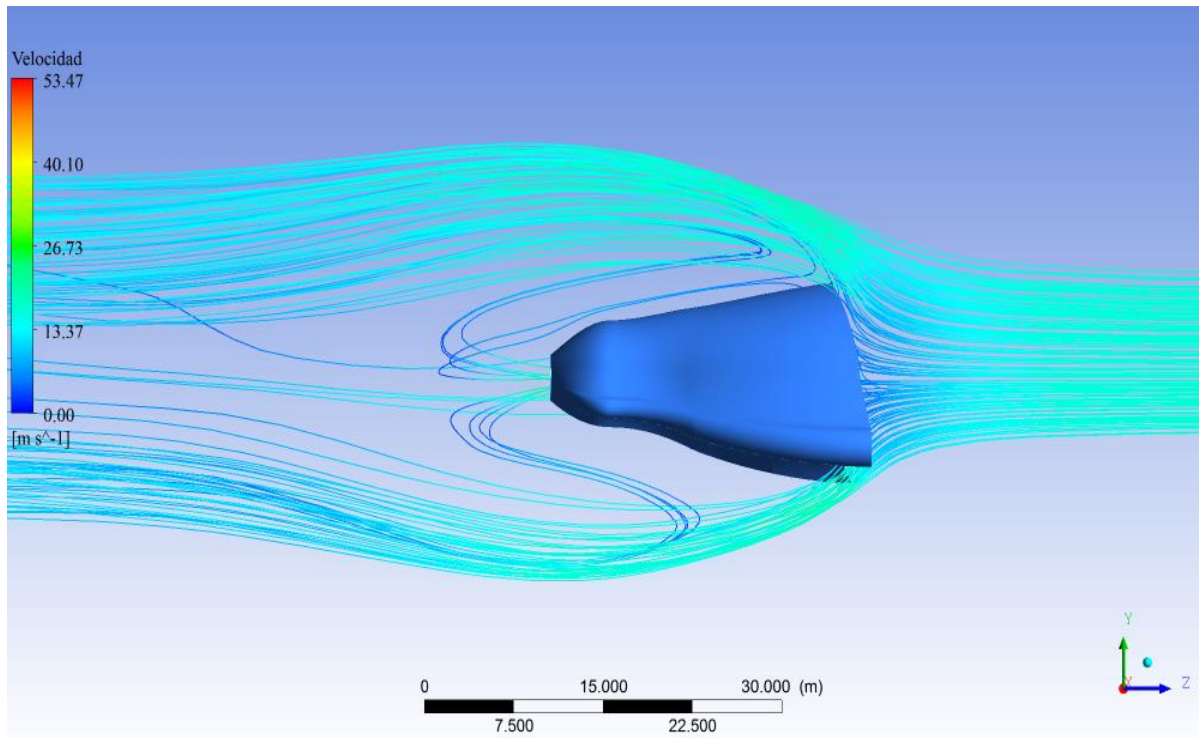


Figura IV.M3-12

Fuente: [EP]

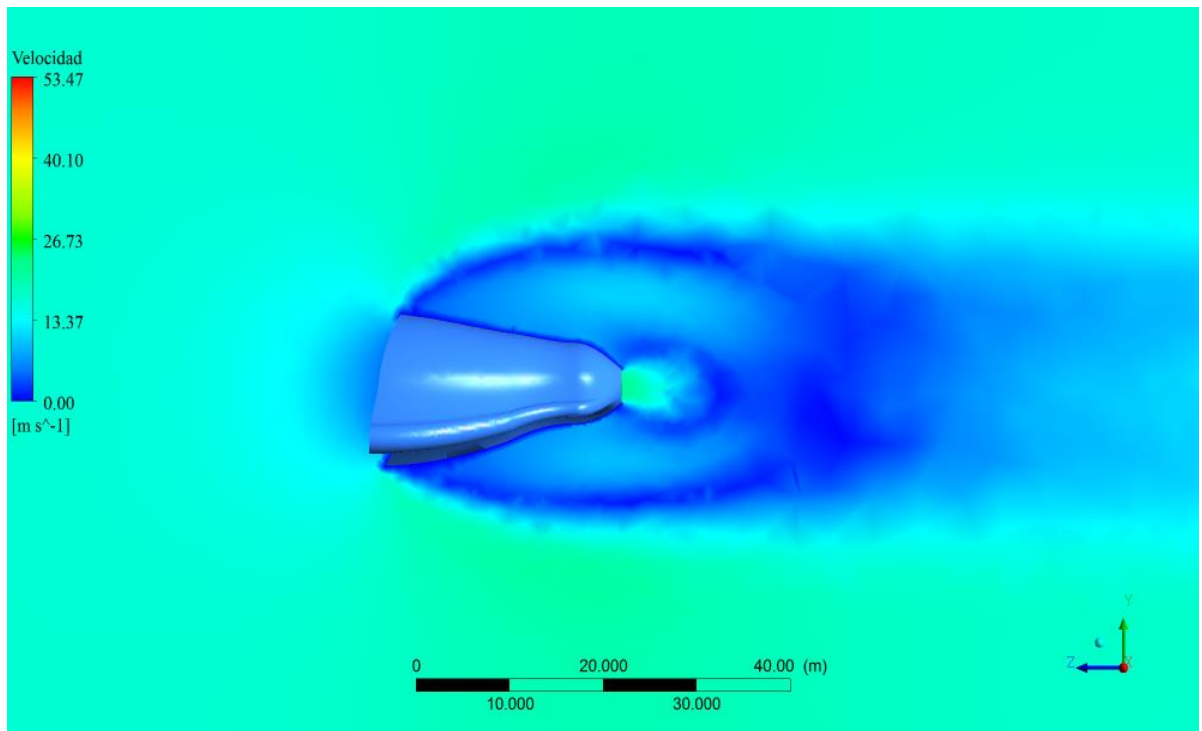


Figura IV.M3-13

Fuente: [EP]

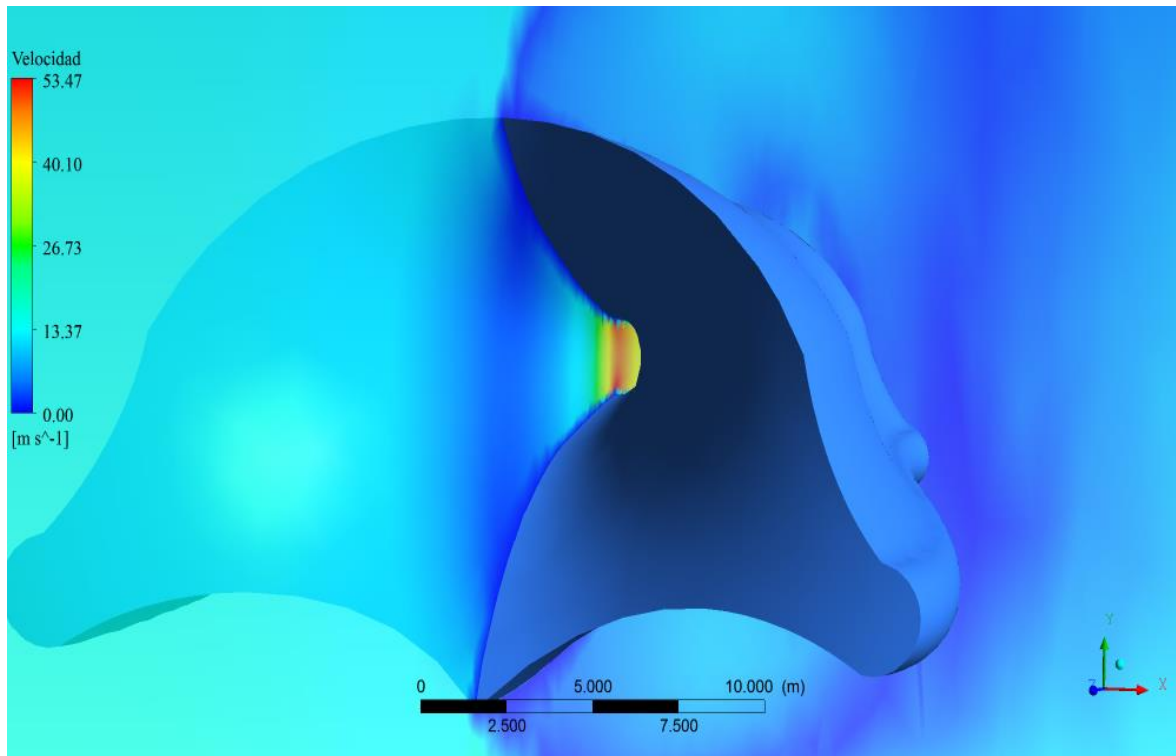


Figura IV.M3-14

Fuente: [EP]

El diseño M4 es idéntico al M3 salvo por que las aristas de la superficie de entrada se han redondeado para ofrecer menos resistencia al avance del oleaje.

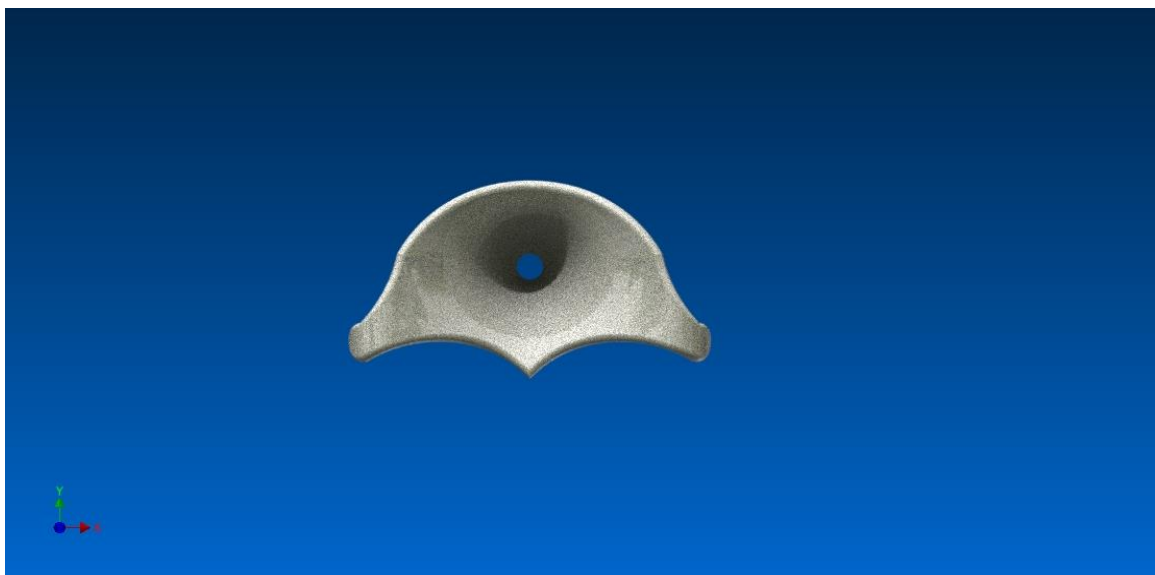


Figura IV.M4-1

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-4

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-5

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-6

Fuente: [EP]



Figura IV.M4-7

Fuente: [EP]

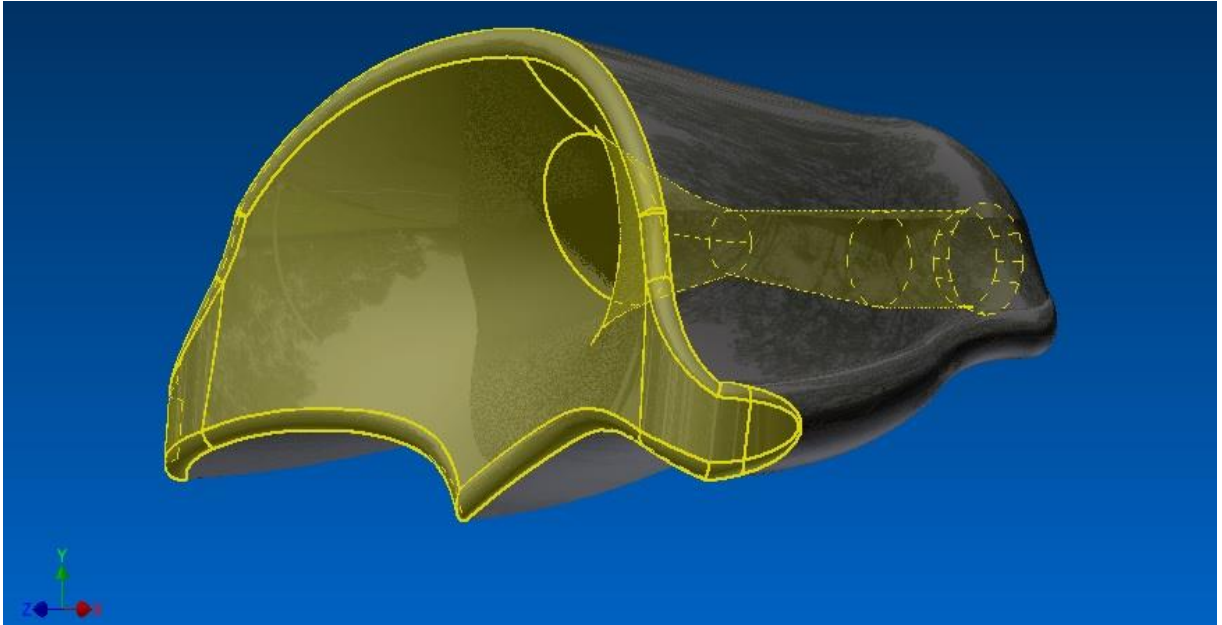


Figura IV.M4-8

Fuente: [EP]

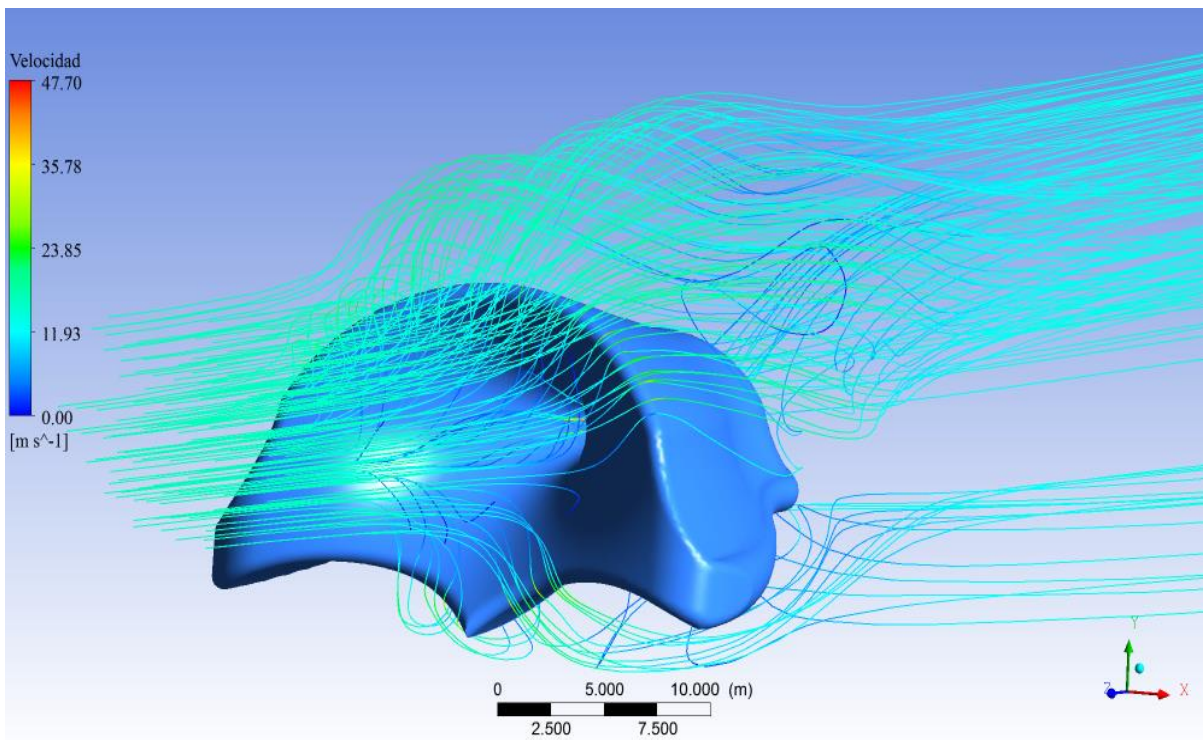


Figura IV.M4-9

Fuente: [EP]

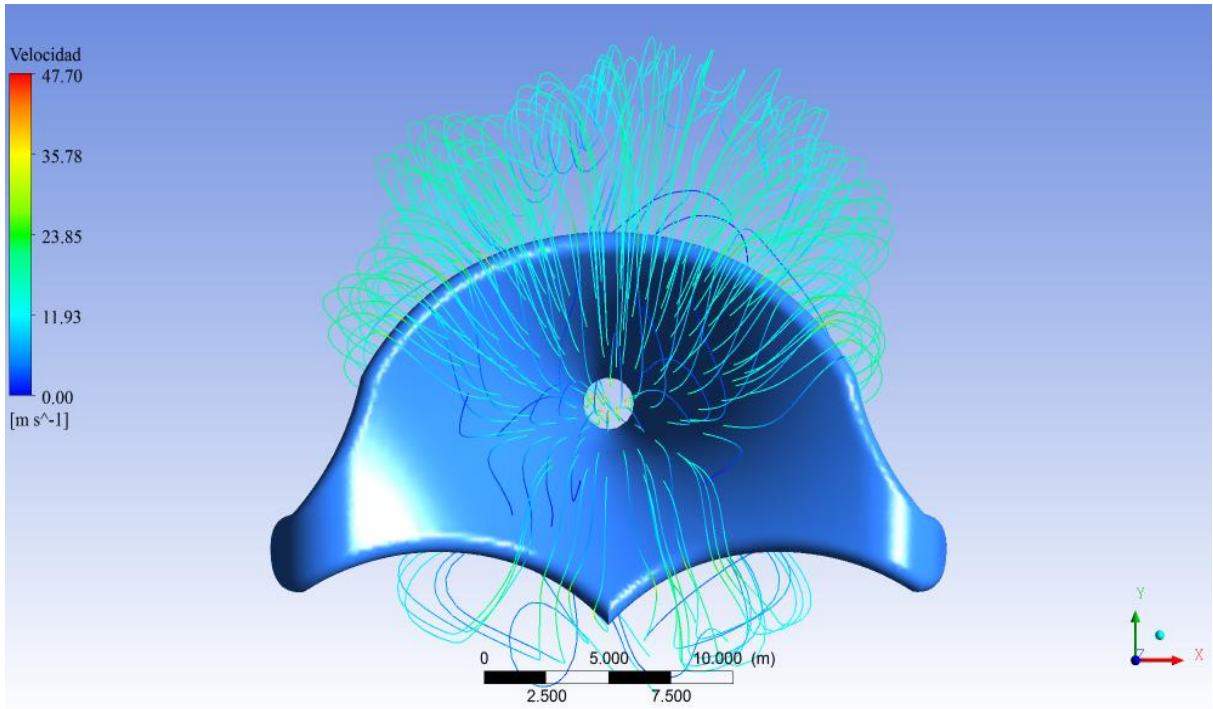


Figura IV.M4-10

Fuente: [EP]

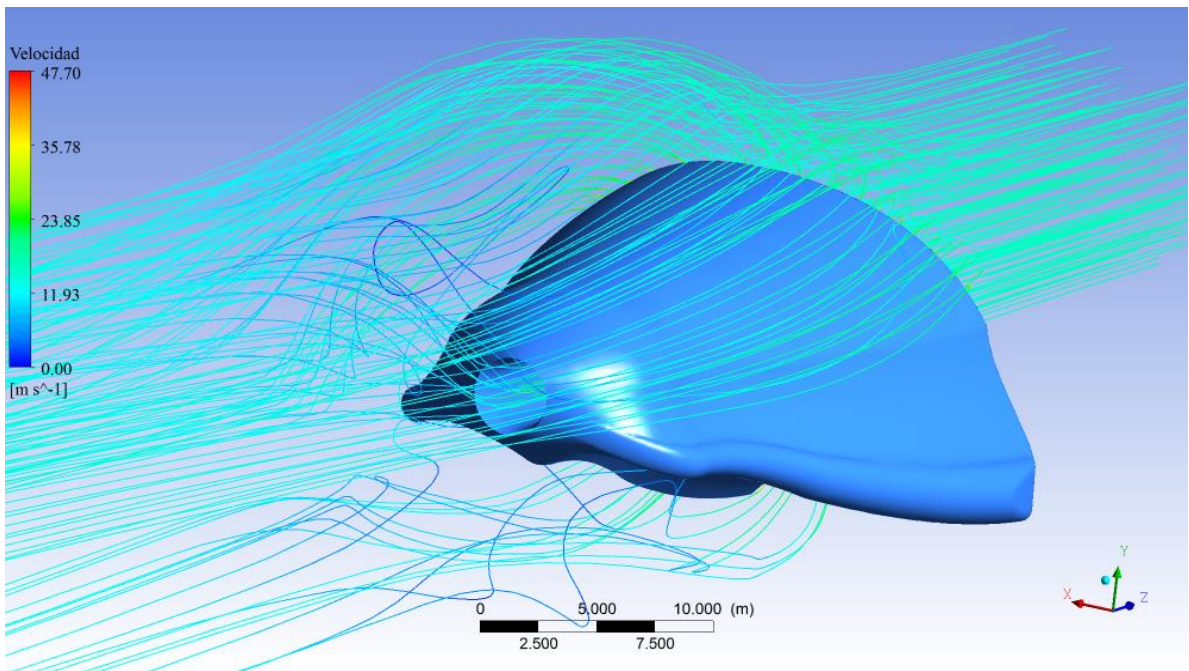


Figura IV.M4-11

Fuente: [EP]

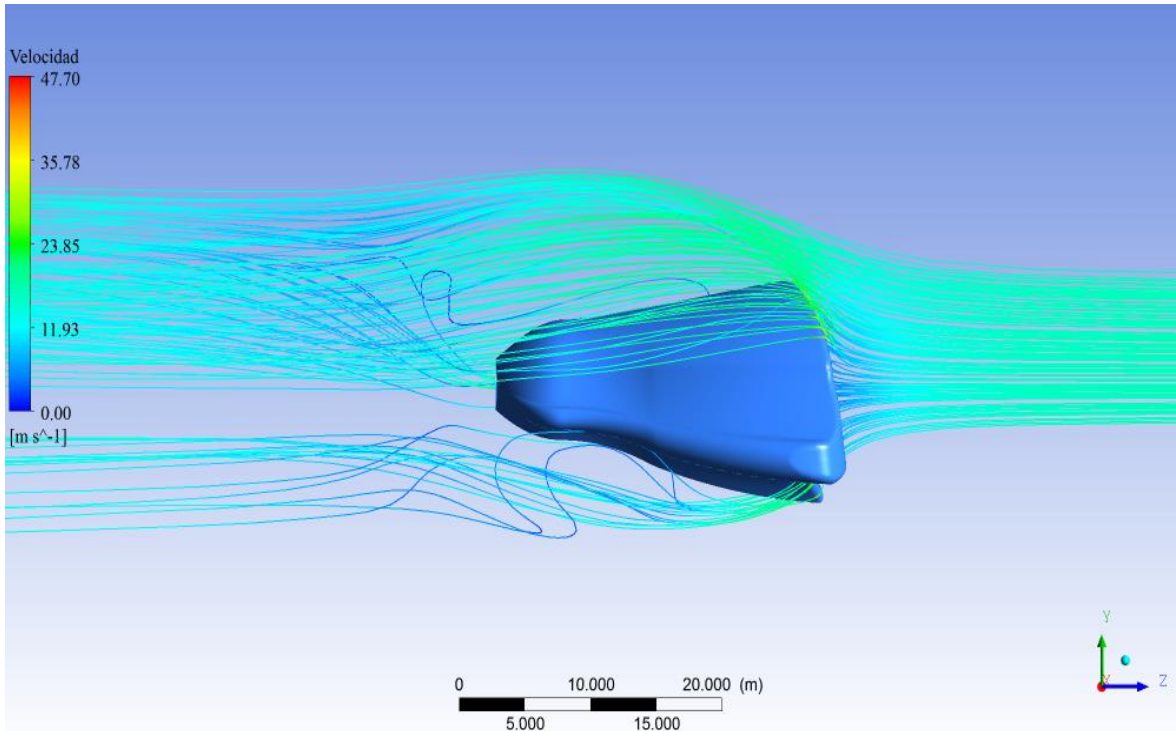


Figura IV.M4-12

Fuente: [EP]

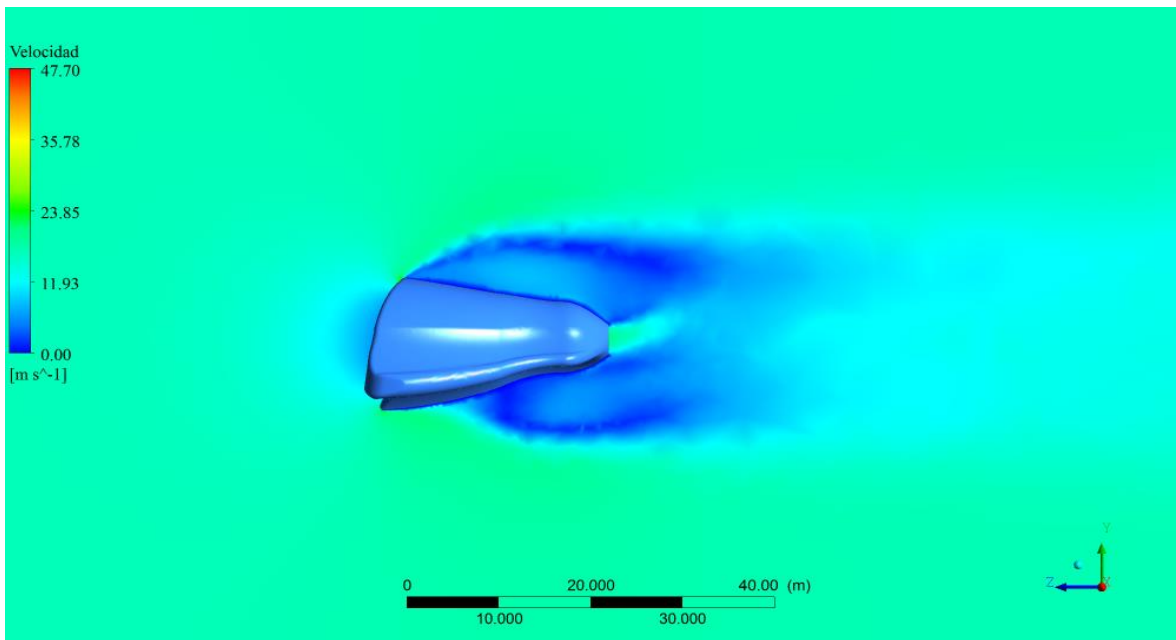


Figura IV.M4-13

Fuente: [EP]

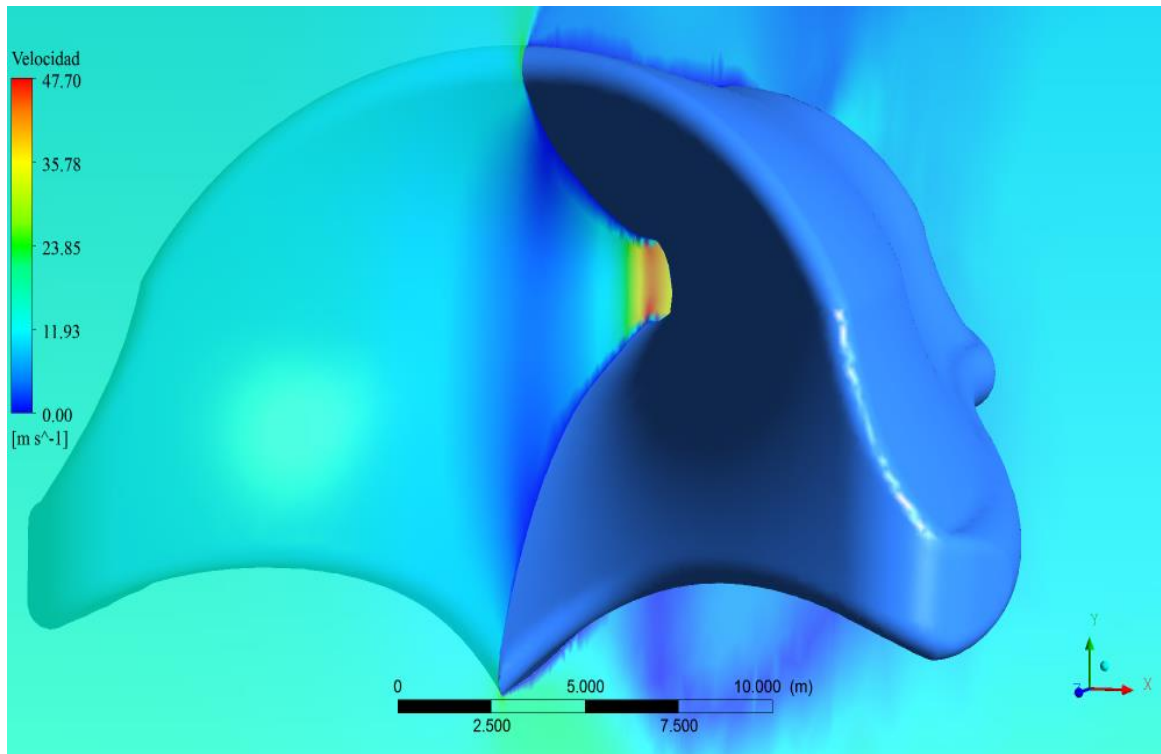


Figura IV.M4-I4

Fuente: [EP]

En estas últimas figuras se aprecia cómo se reduce tanto la velocidad como las recirculaciones de las líneas de corriente.

El diseño M5 también tiene el diámetro de entrada de 10 metros con una superficie cóncava pero tiene dos grandes diferencias con respecto a sus antecesores que son: se cambia la forma inferior de una "v" a una omega invertida con el fin de mejorar la salida de agua de la turbina y se le ha añadido una aleta trasera inferior a modo de timón fijo para poder realizar la orientación de forma automática y más eficiente que los modelos anteriores. En las siguientes figuras se observan sus características geométricas.



Figura IV.M5-1

Fuente: [EP]

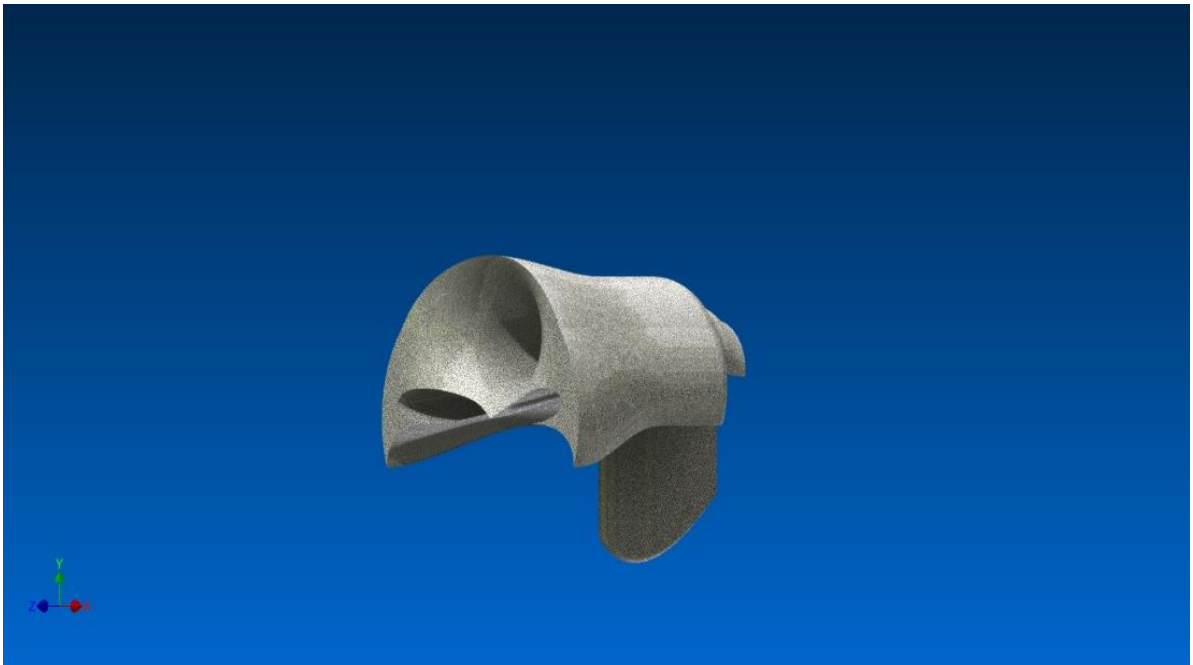


Figura IV.M5-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M5-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M5-4

Fuente: [EP]



Figura IV.M5-5

Fuente: [EP]

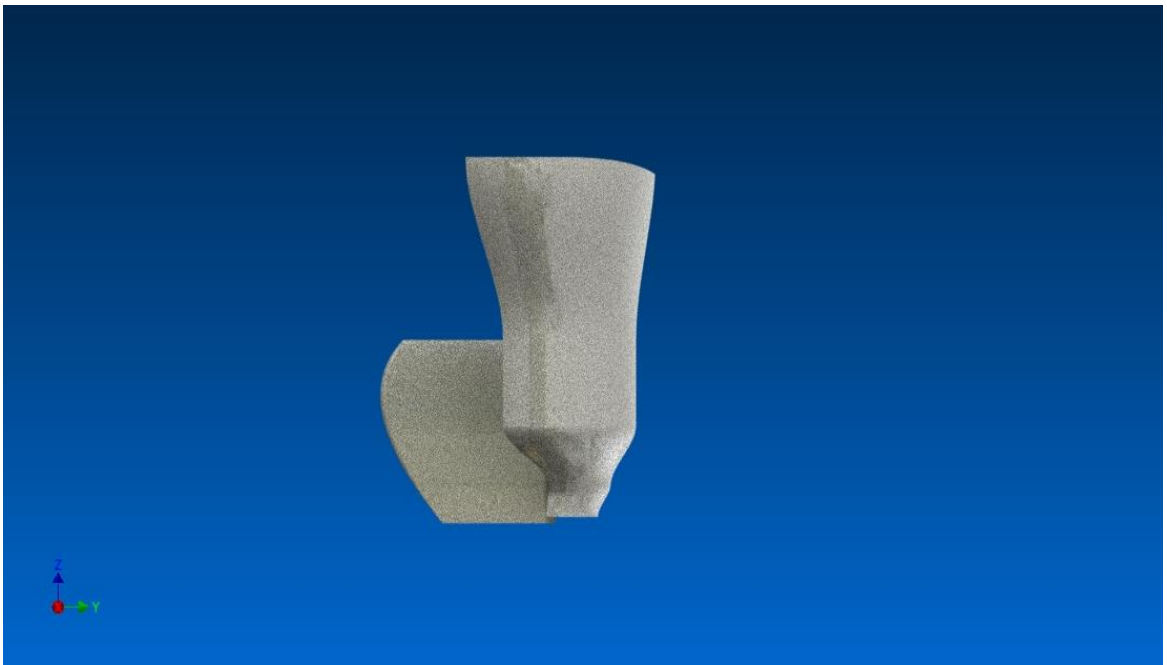


Figura IV.M5-6

Fuente: [EP]

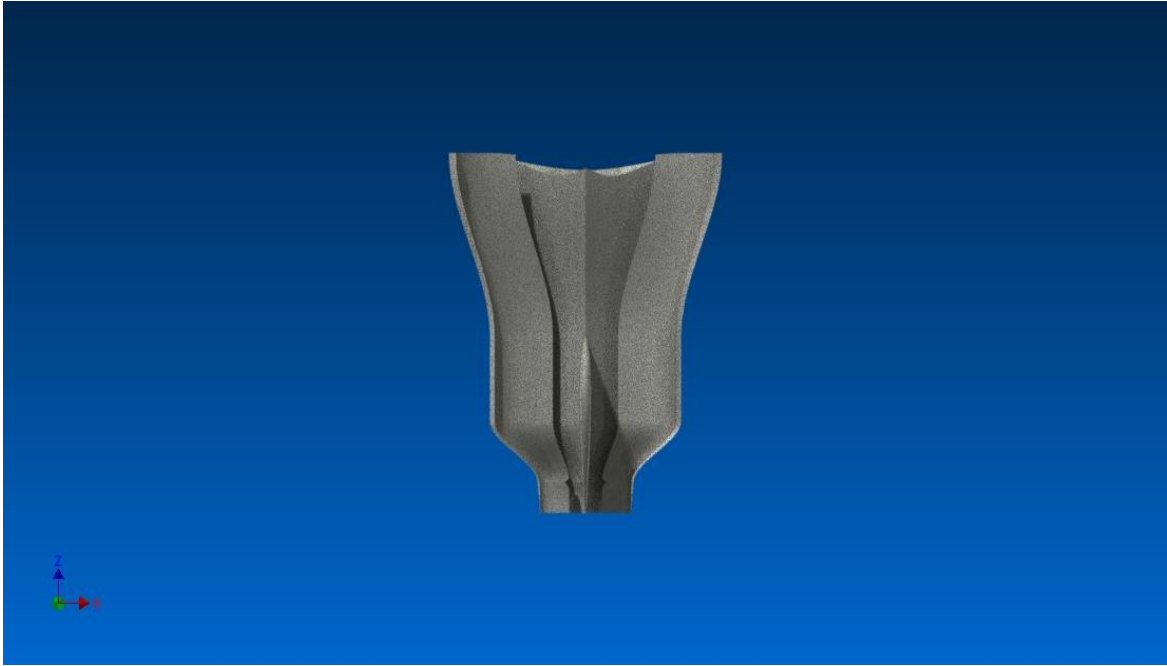


Figura IV.M5-7

Fuente: [EP]



Figura IV.M5-8

Fuente: [EP]

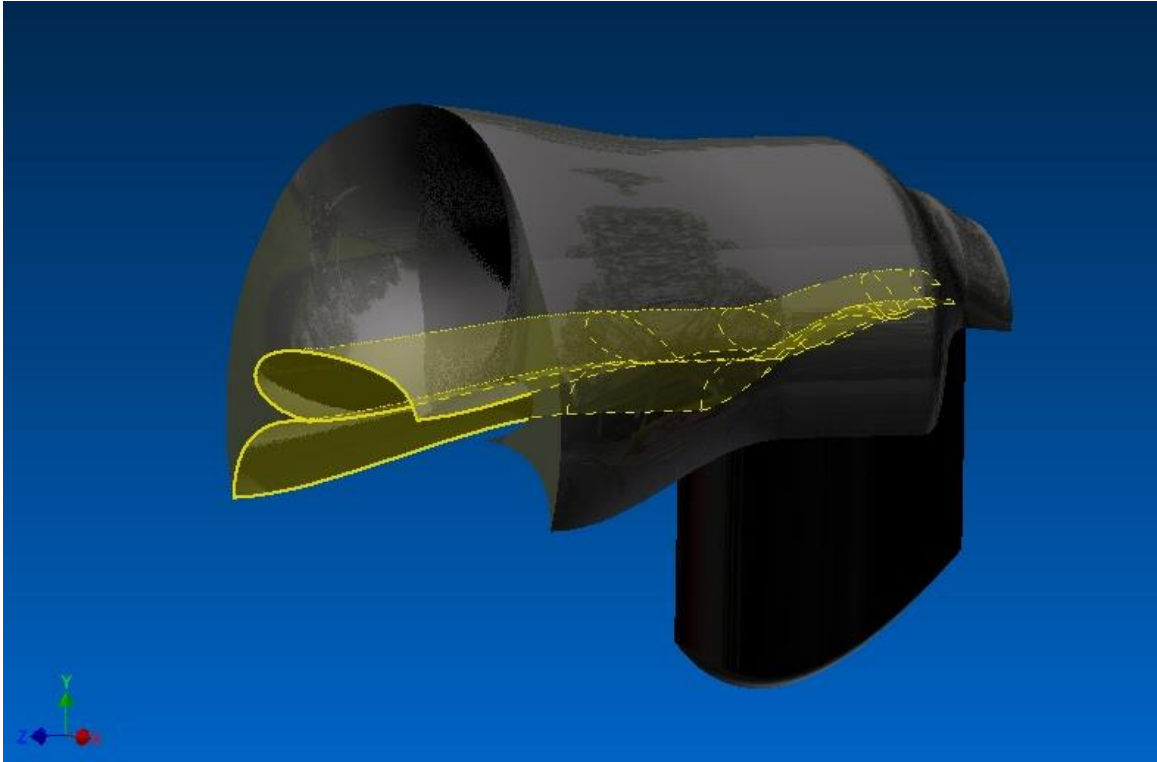


Figura IV.M5-9

Fuente: [EP]

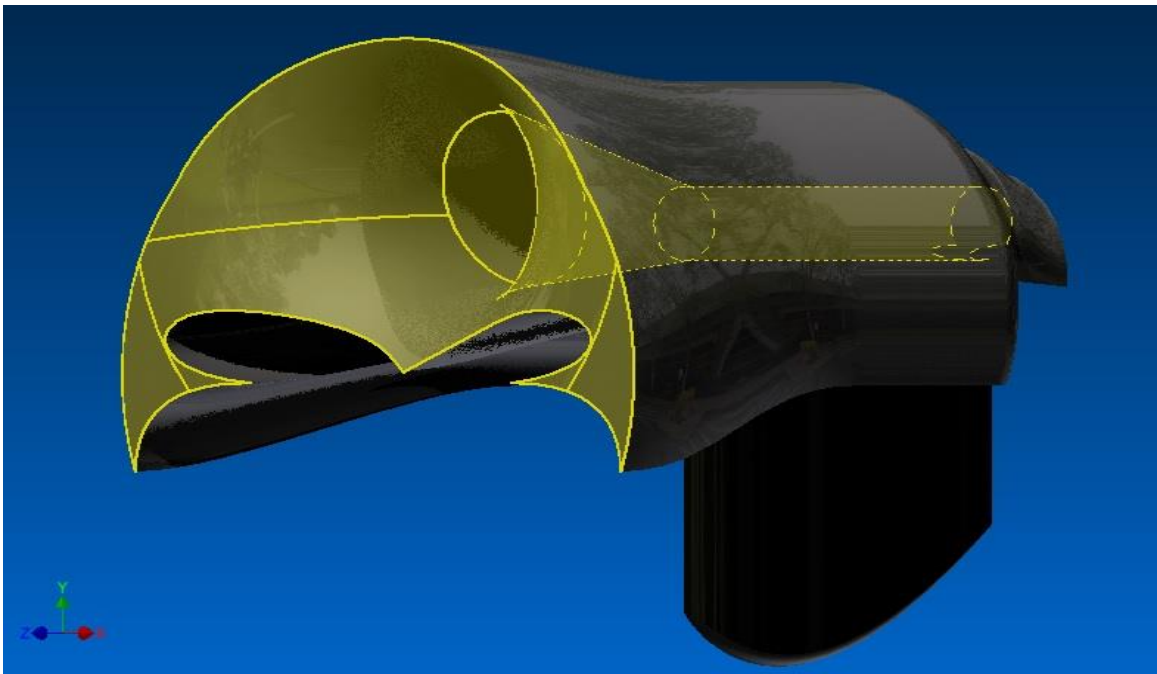


Figura IV.M5-10

Fuente: [EP]

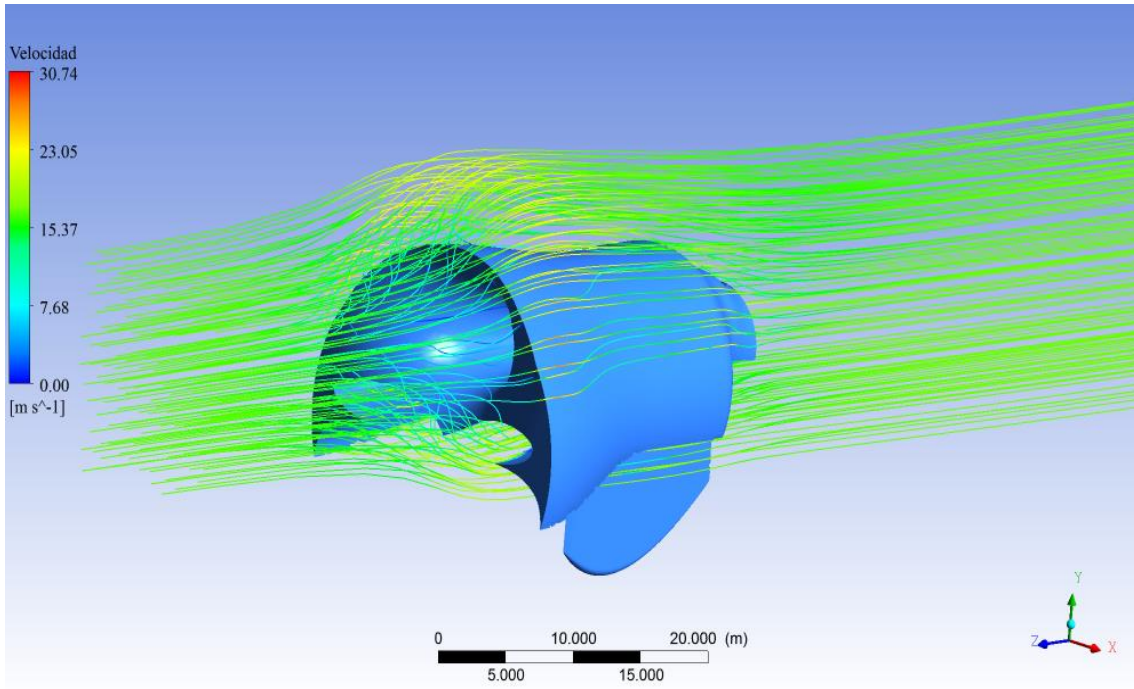


Figura IV.M5-II

Fuente: [EP]

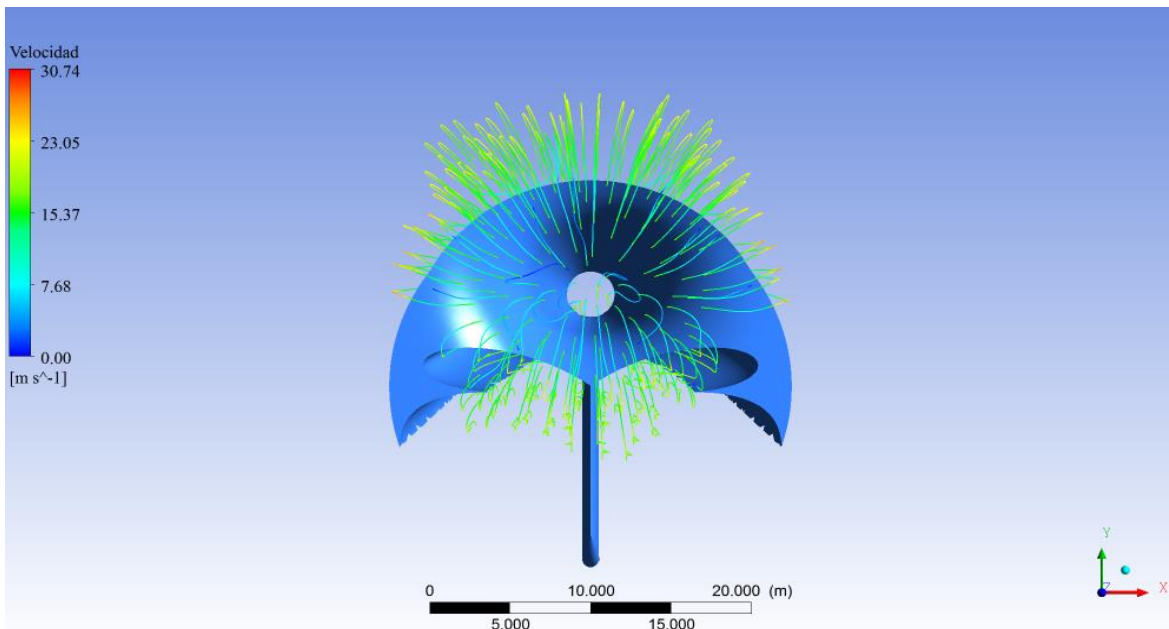


Figura IV.M5-12

Fuente: [EP]

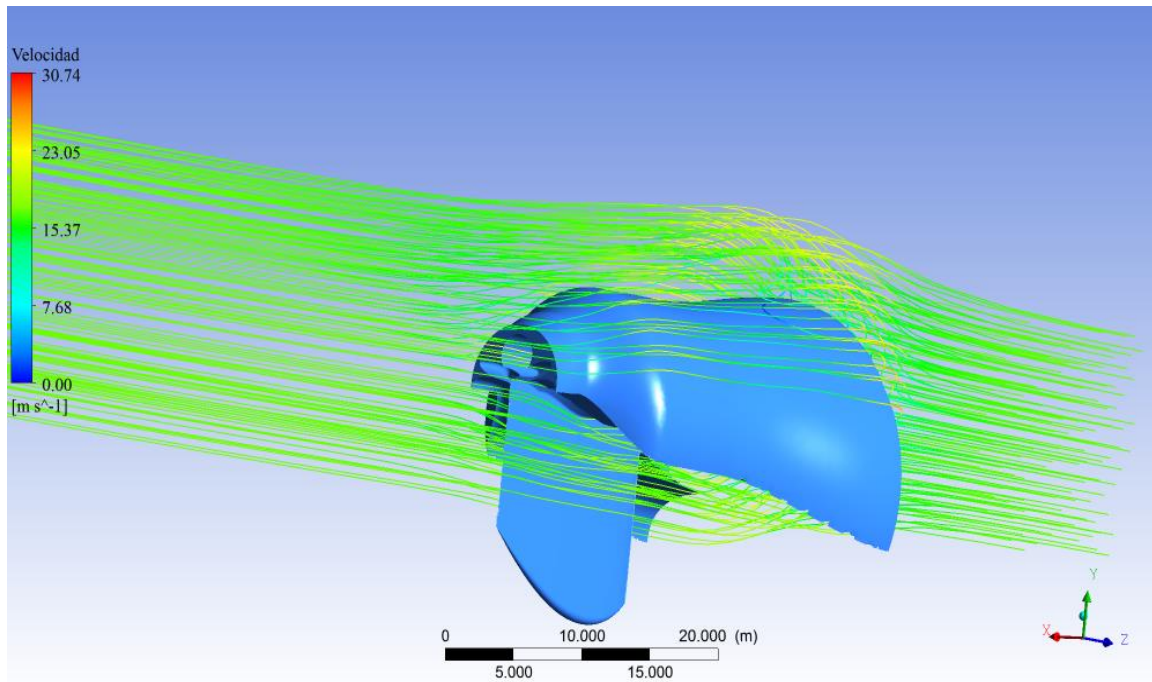


Figura IV.M5-13

Fuente: [EP]

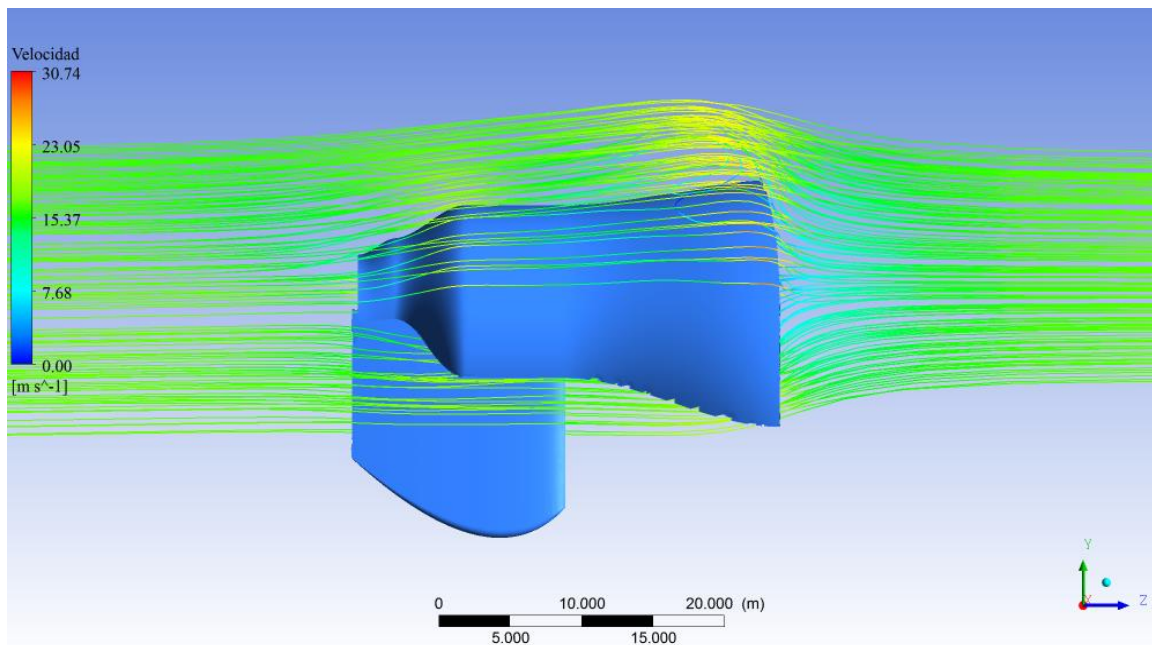


Figura IV.M5-14

Fuente: [EP]

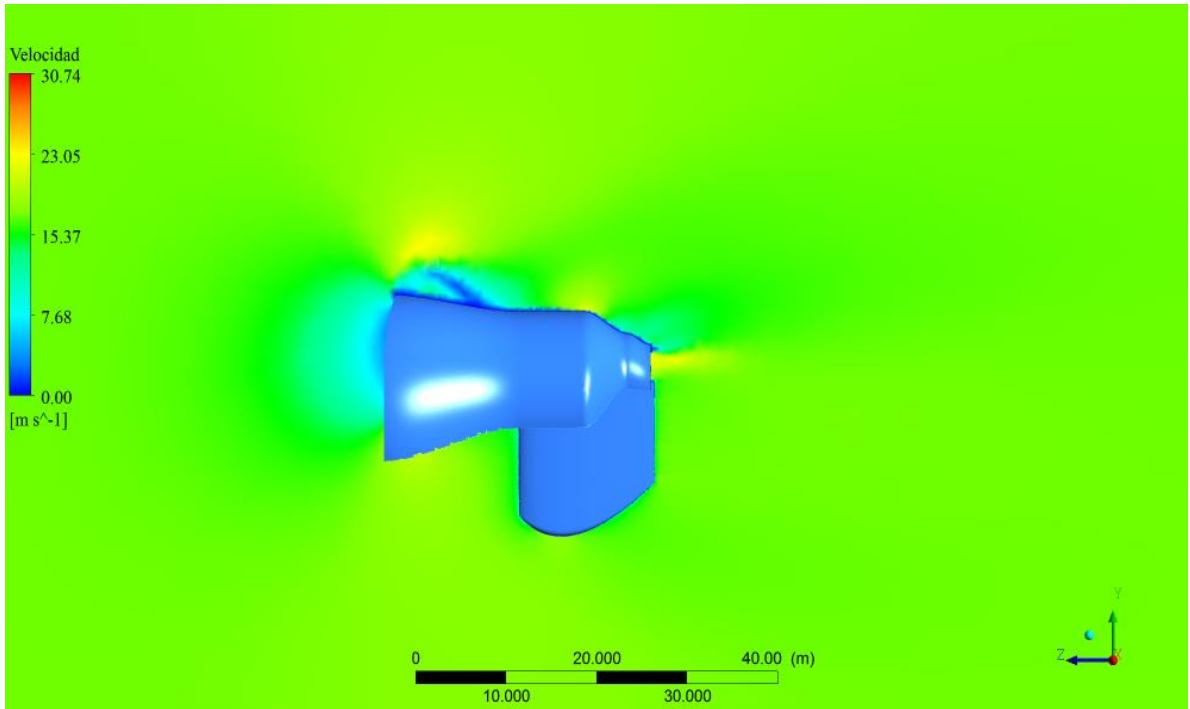


Figura IV.M5-15

Fuente: [EP]

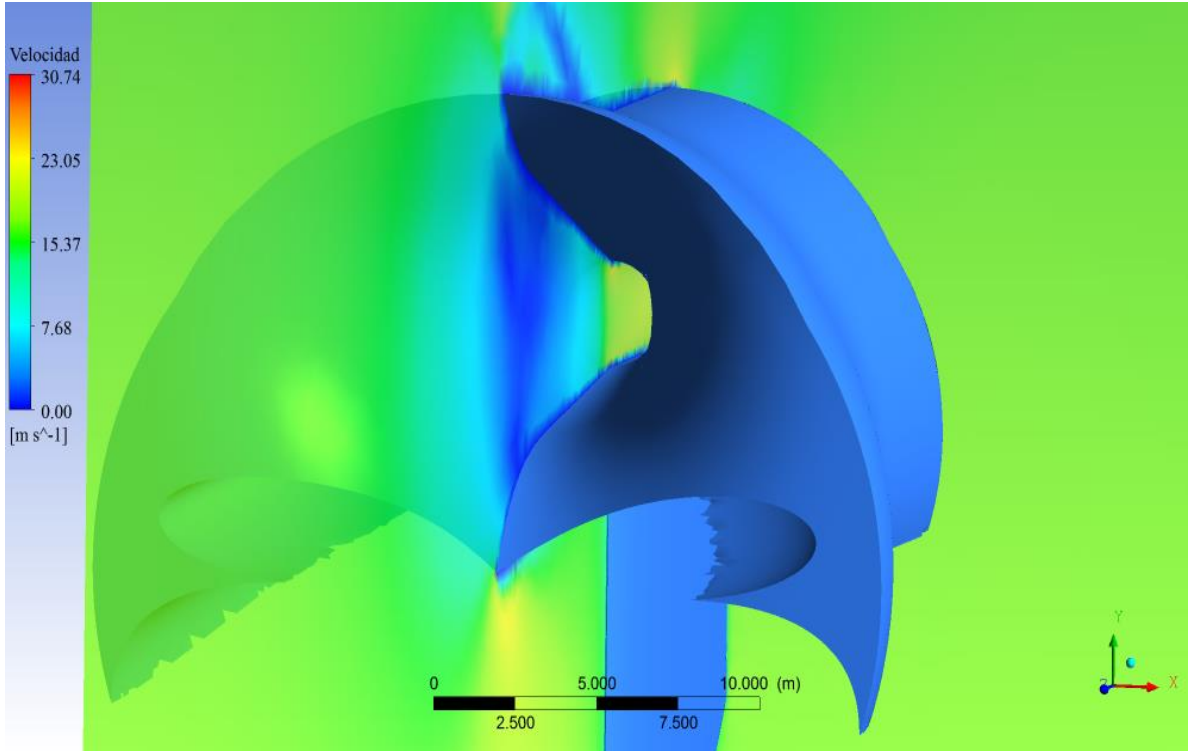


Figura IV.M5-16

Fuente: [EP]

En las figuras de las Streamline y los planos anteriores se observa cómo se reduce casi por completo la recirculación del agua así como la forma en la que el diseño canaliza el agua para que ésta salga de forma más eficiente del tubo, mejorando de forma considerable los diseños anteriores

El diseño M6 se ha diseñado con la una forma mezcla de un barco con un submarino, para ver si es posible realizar un diseño con bajo arrastre de éstos con la eficiencia del diseño anterior M5 para recoger y canalizar el agua hacia el tubo. Éste diseño solamente tiene la forma no lleva tubo.

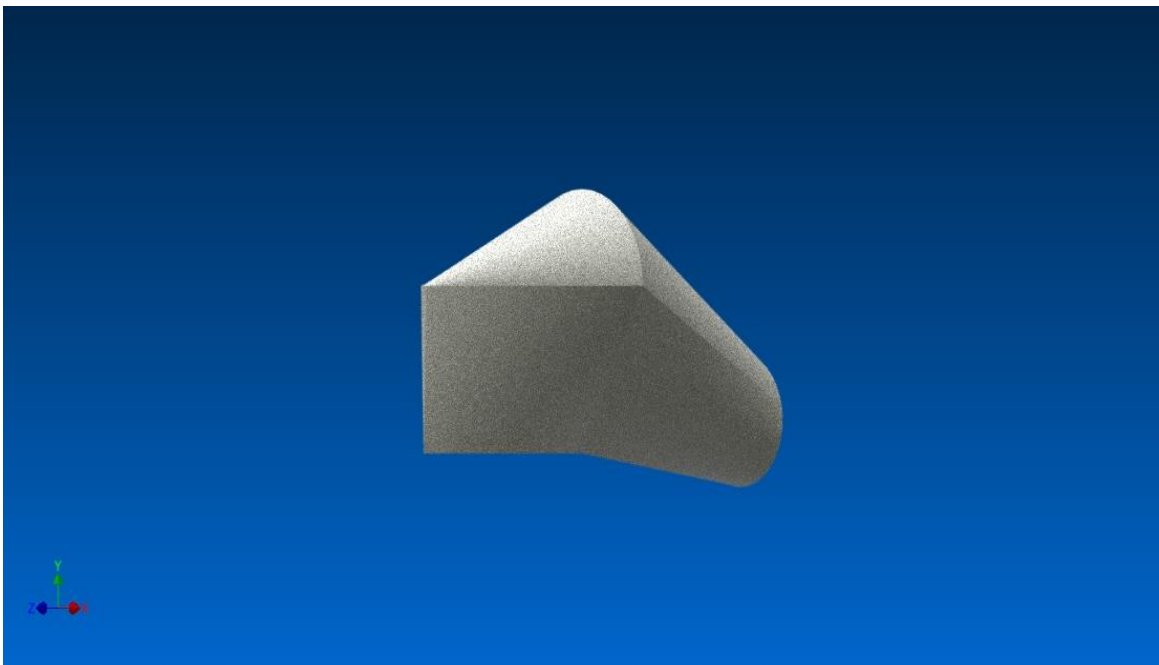


Figura IV.M6-1

Fuente: [EP]

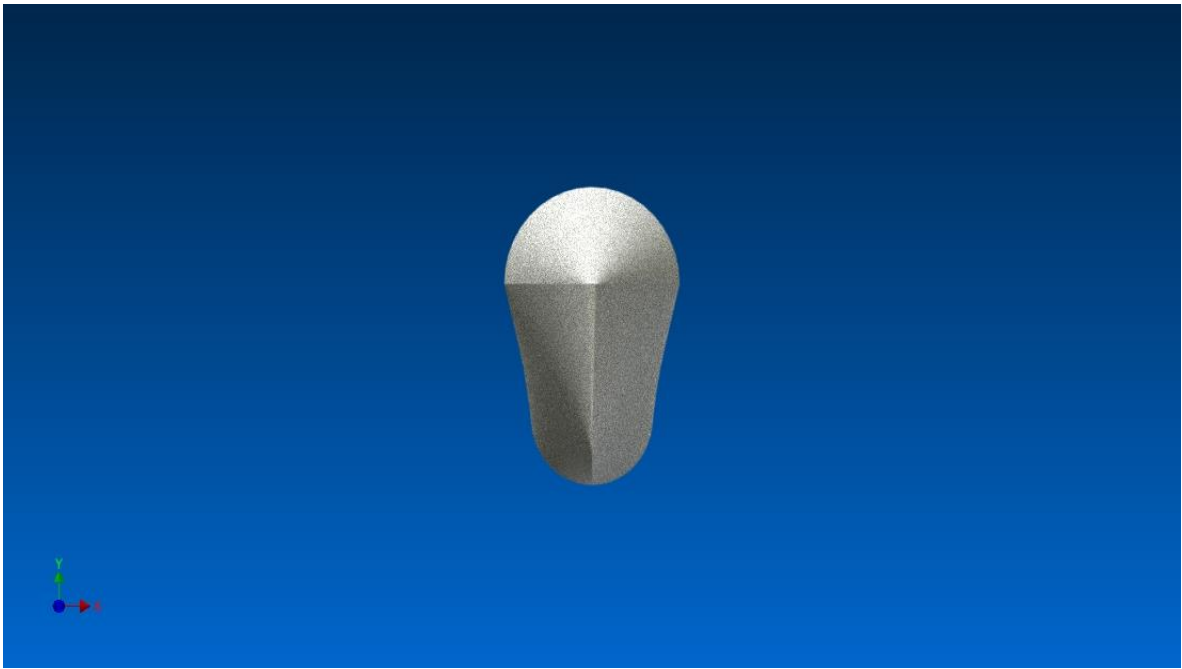


Figura IV.M6-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M6-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M6-4

Fuente: [EP]

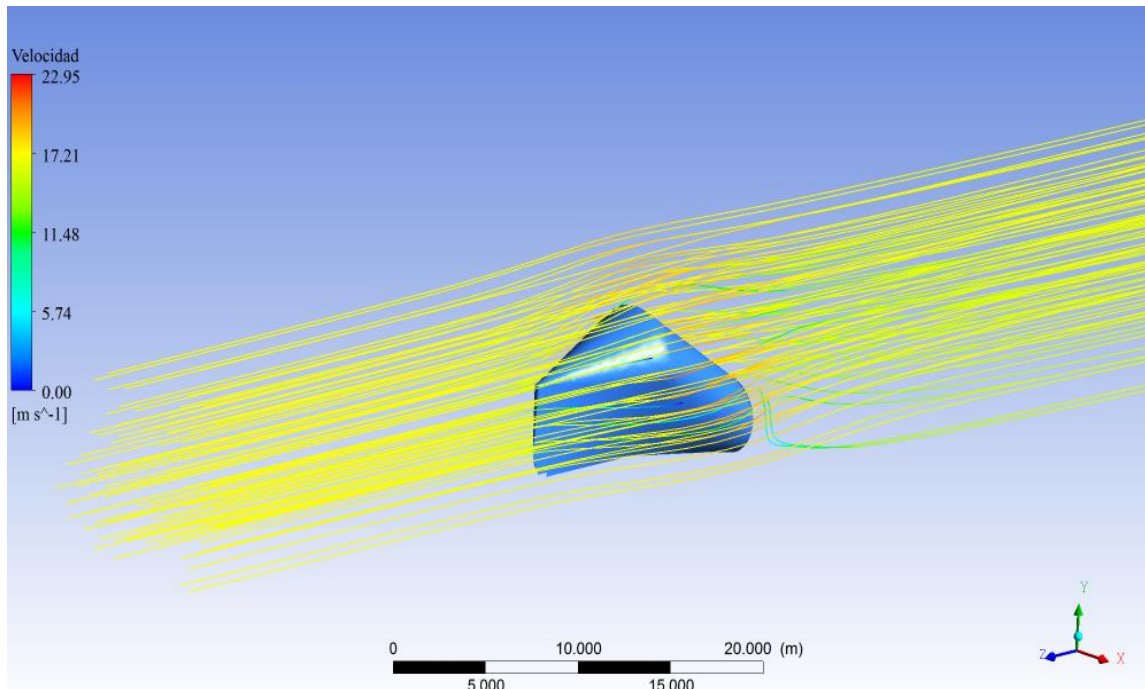


Figura IV.M6-5

Fuente: [EP]

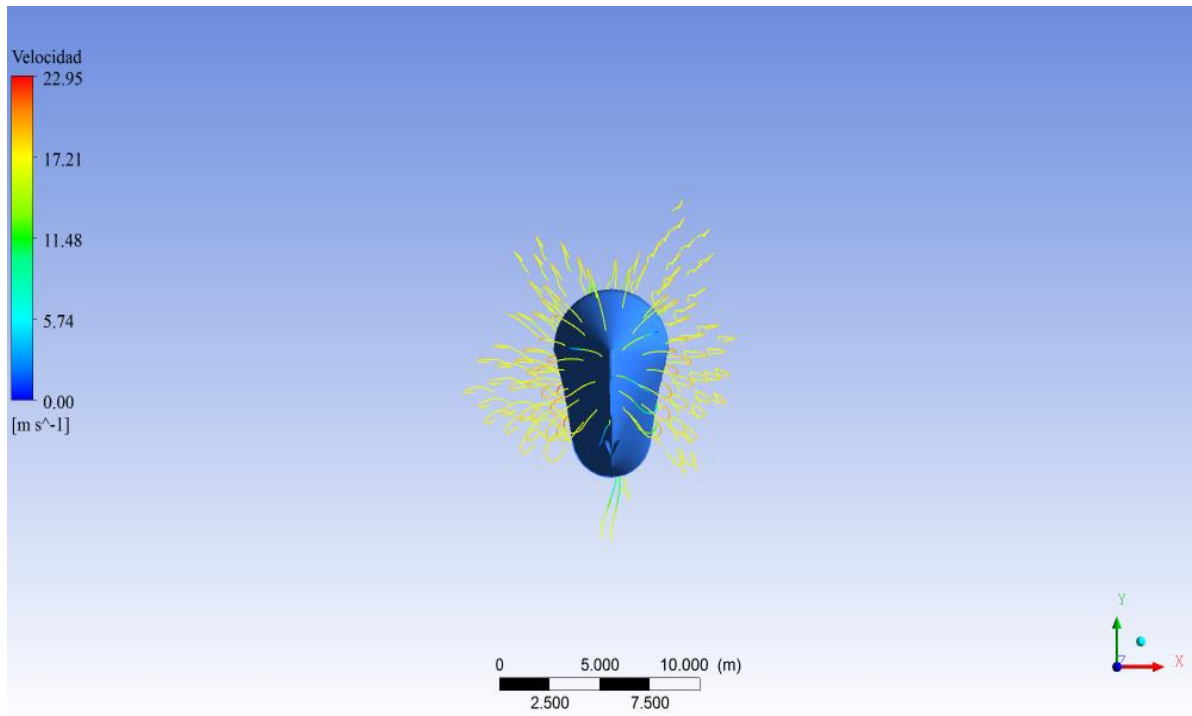


Figura IV.M6-6

Fuente: [EP]

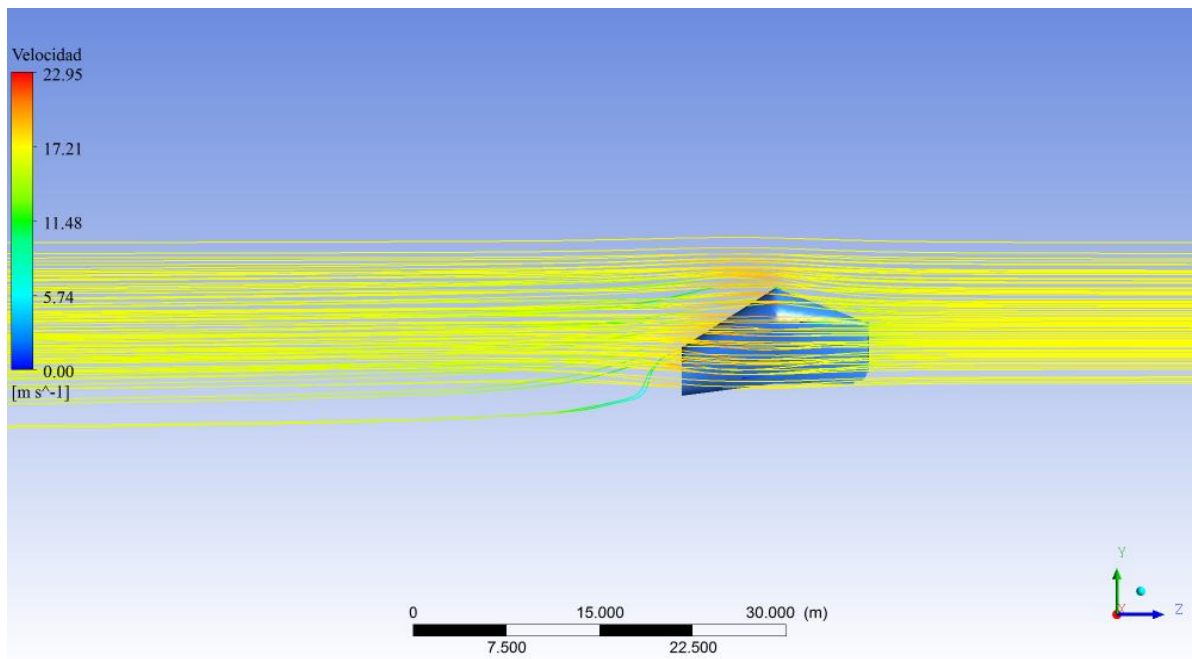


Figura IV.M6-7

Fuente: [EP]

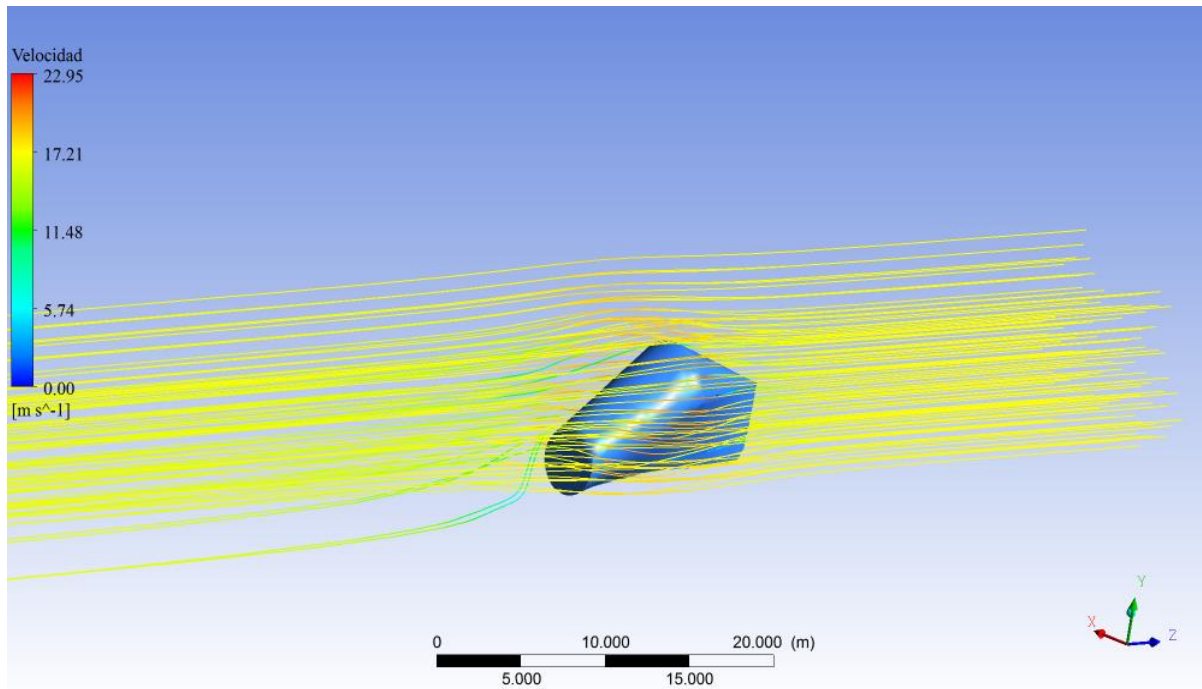


Figura IV.M6-8

Fuente: [EP]

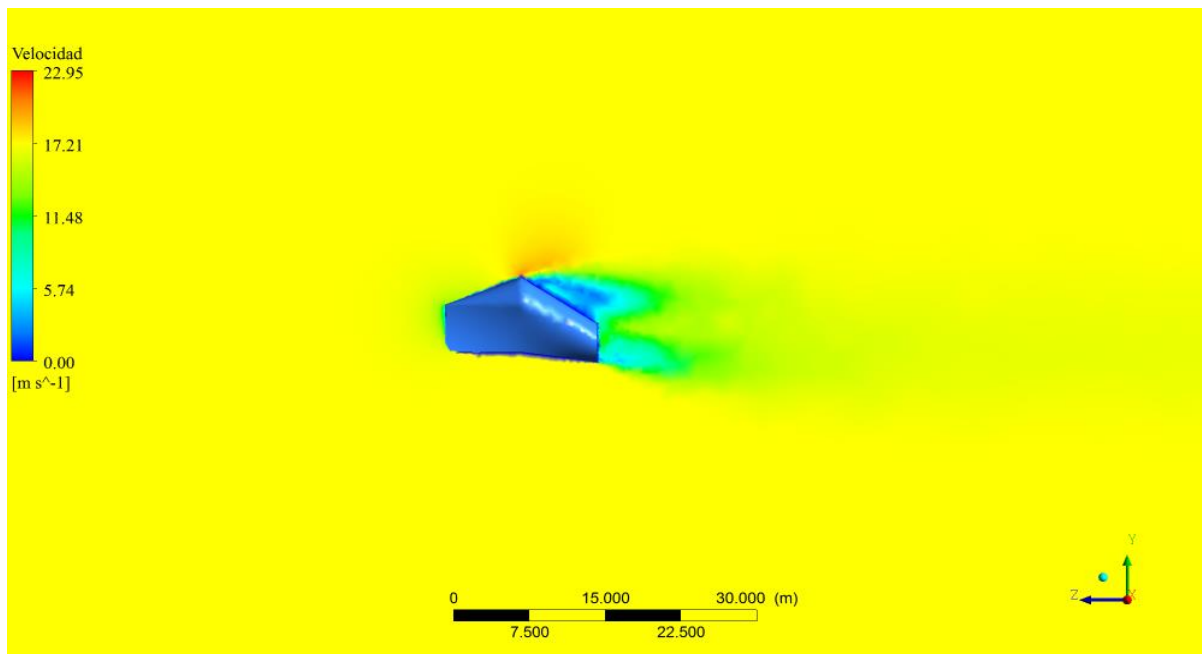


Figura IV.M6-9

Fuente: [EP]

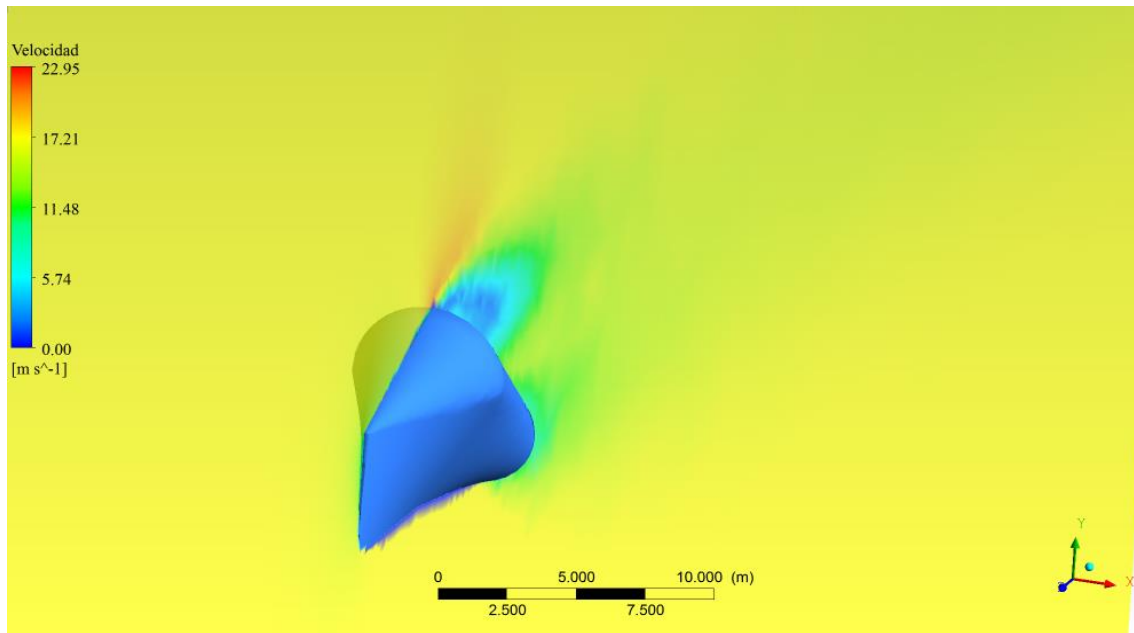


Figura IV.M6-10

Fuente: [EP]

En las Streamline anteriores se observa la resistencia mínima que ofrece al paso por el agua, algo que ya se intuía, y que se tratará incorporar a los siguientes diseños unido con la ventaja del diseño M5 para canalizar el agua.

El modelo M7 es similar al M6 pero cambiando la quilla vertical por una con inclinación para cortar mejor las olas y tener menos resistencia a su paso. La otra gran diferencia reside en el tubo para albergar la turbina, como vemos es más difícil situar el tubo que en los modelos M5 y anteriores debido a la propia forma del casco del diseño que como se comentó anteriormente para M6 intenta ser lo más hidrodinámico posible.

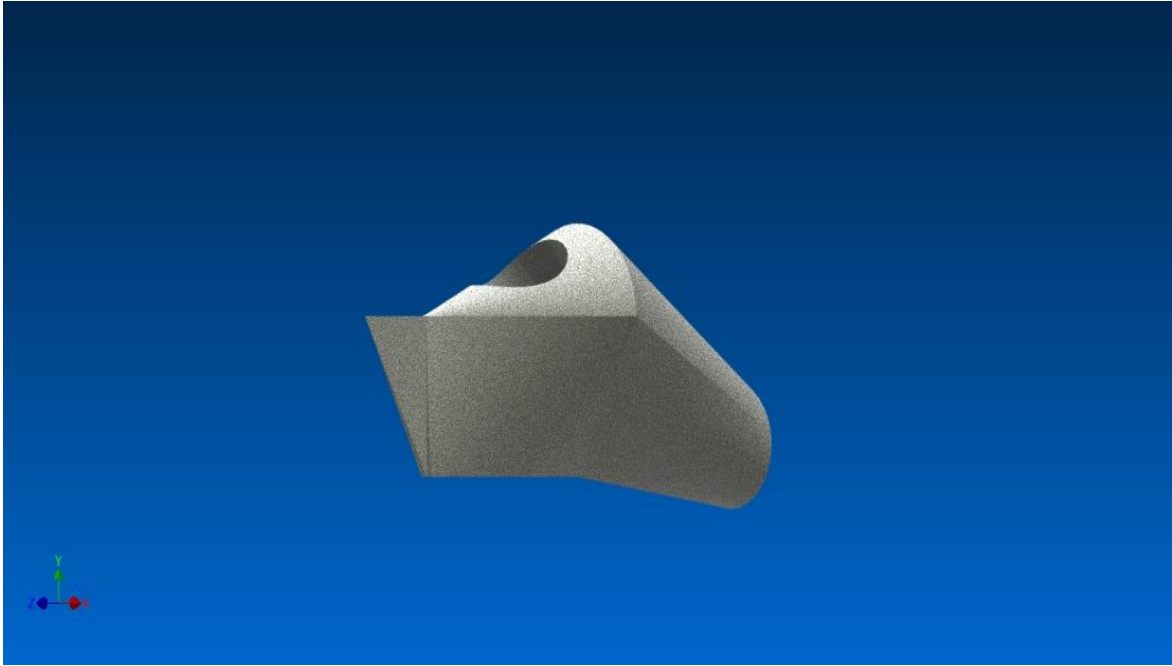


Figura IV.M7-1

Fuente: [EP]

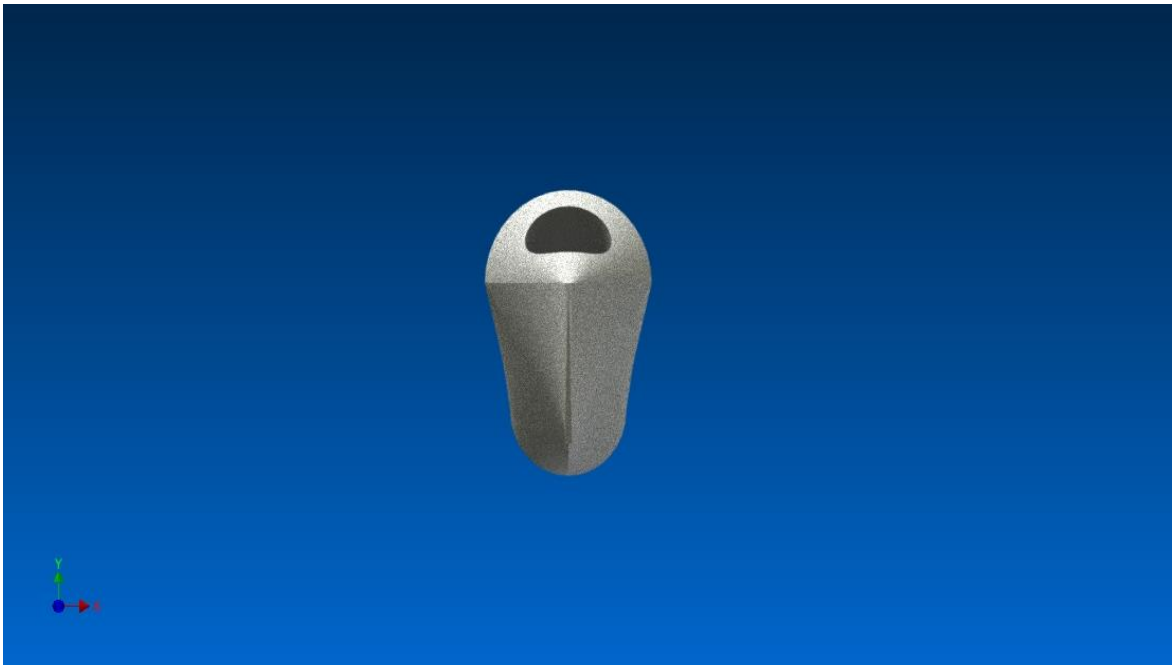


Figura IV.M7-2

Fuente: [EP]

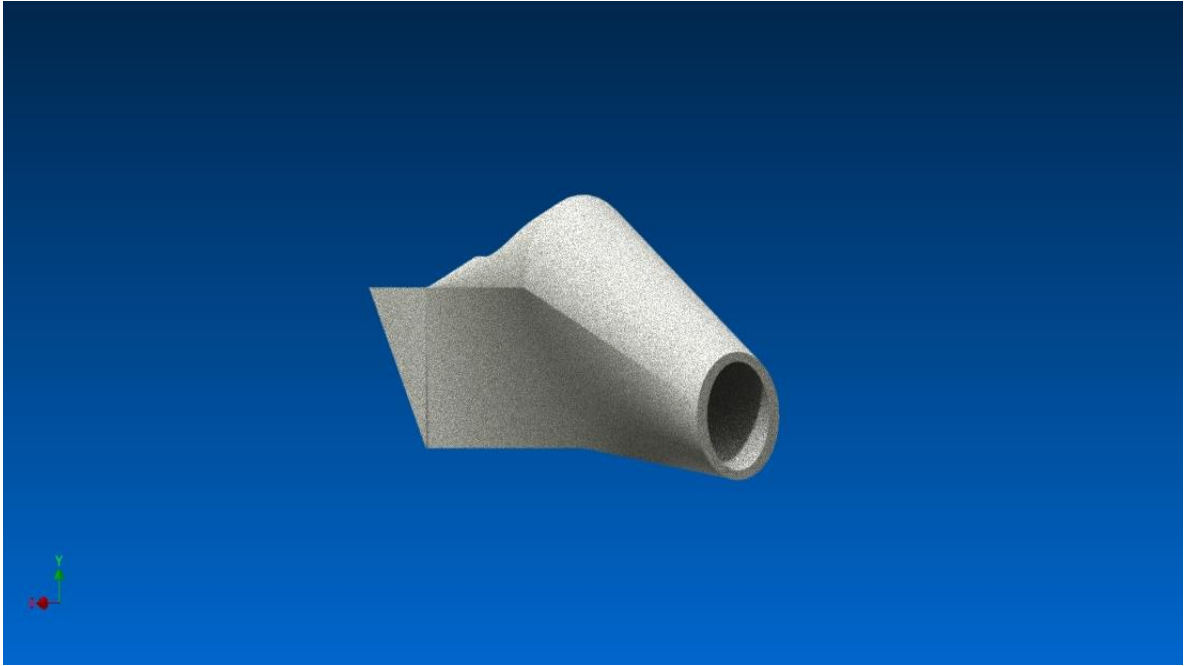


Figura IV.M7-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M7-4

Fuente: [EP]

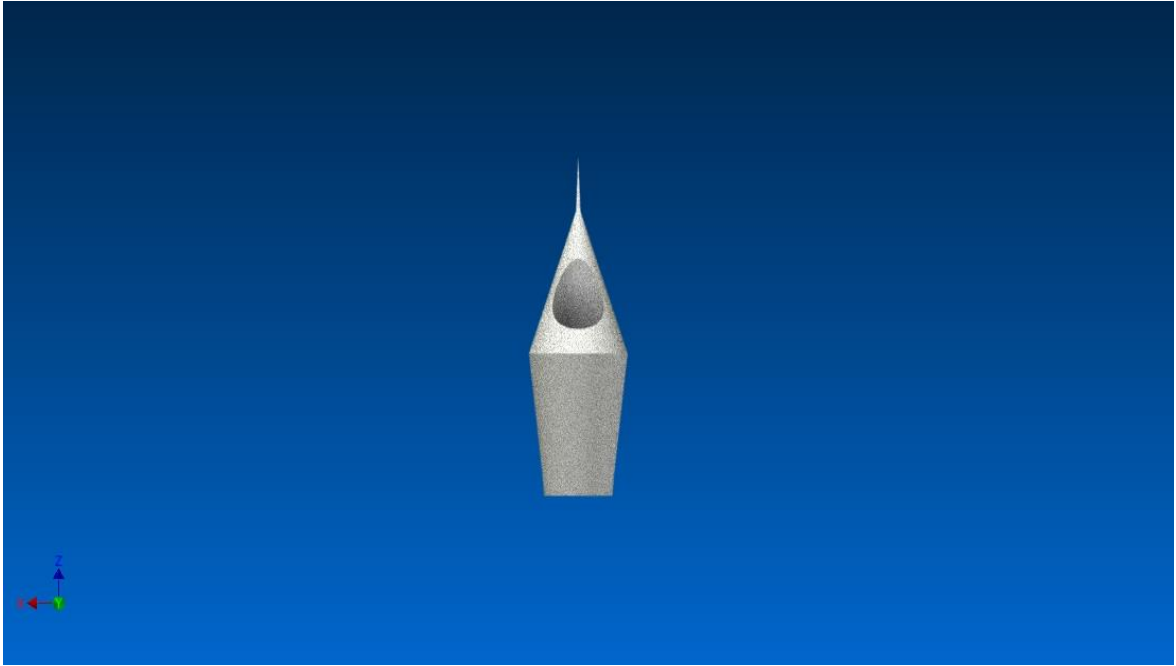


Figura IV.M7-5

Fuente: [EP]

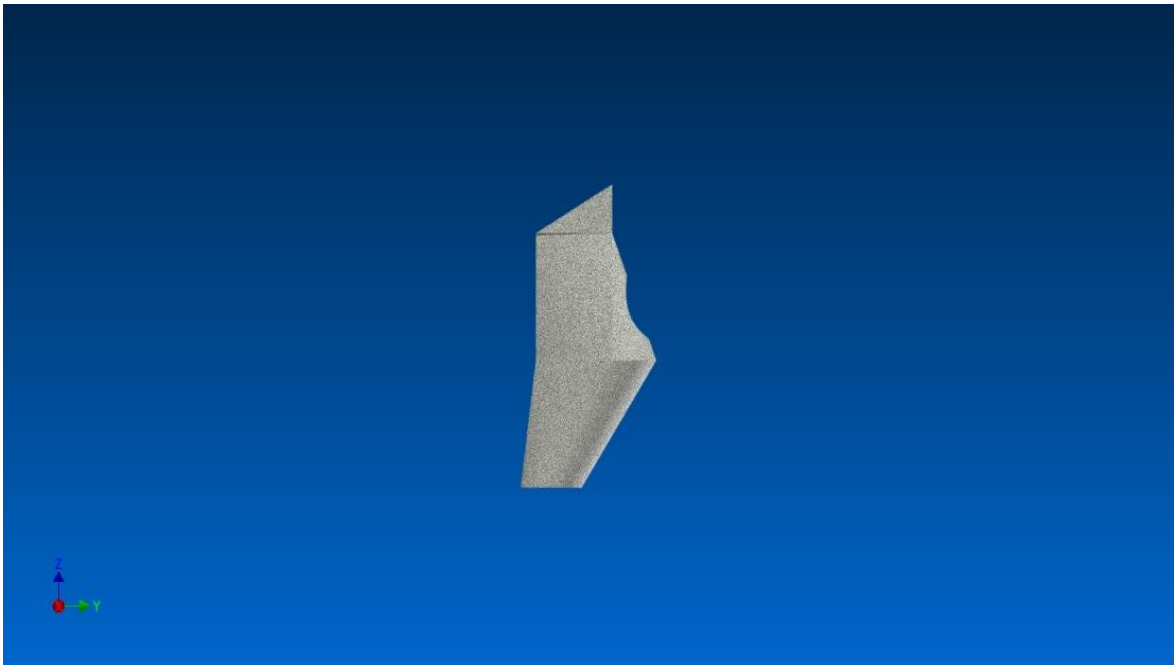


Figura IV.M7-6

Fuente: [EP]

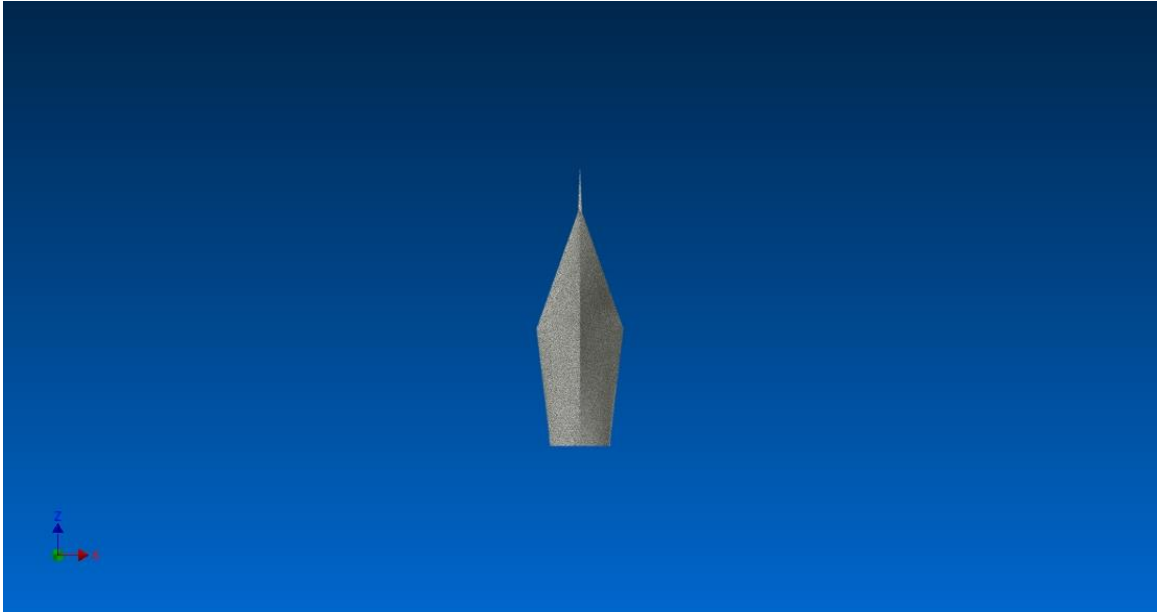


Figura IV.M7-7

Fuente: [EP]

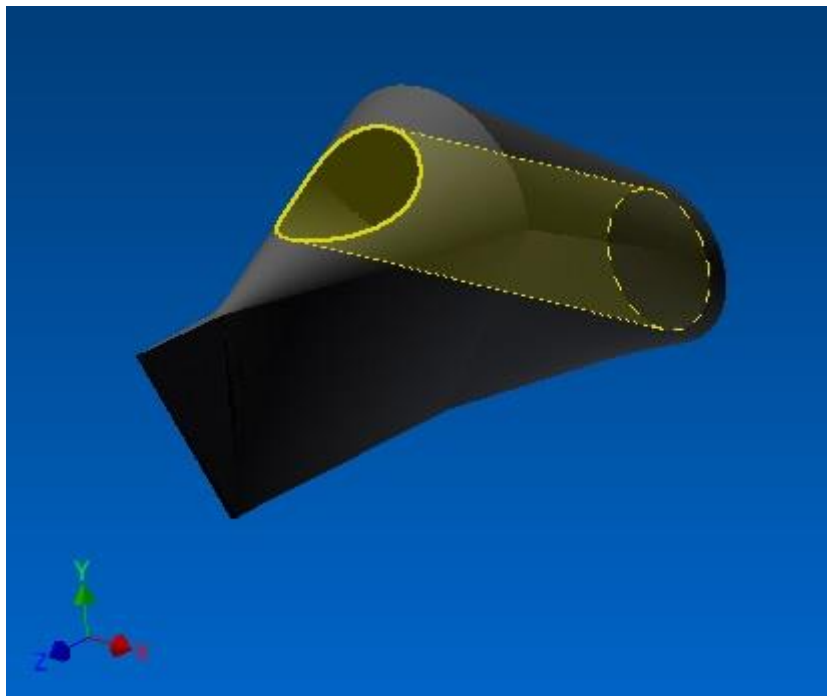


Figura IV.M7-8

Fuente: [EP]

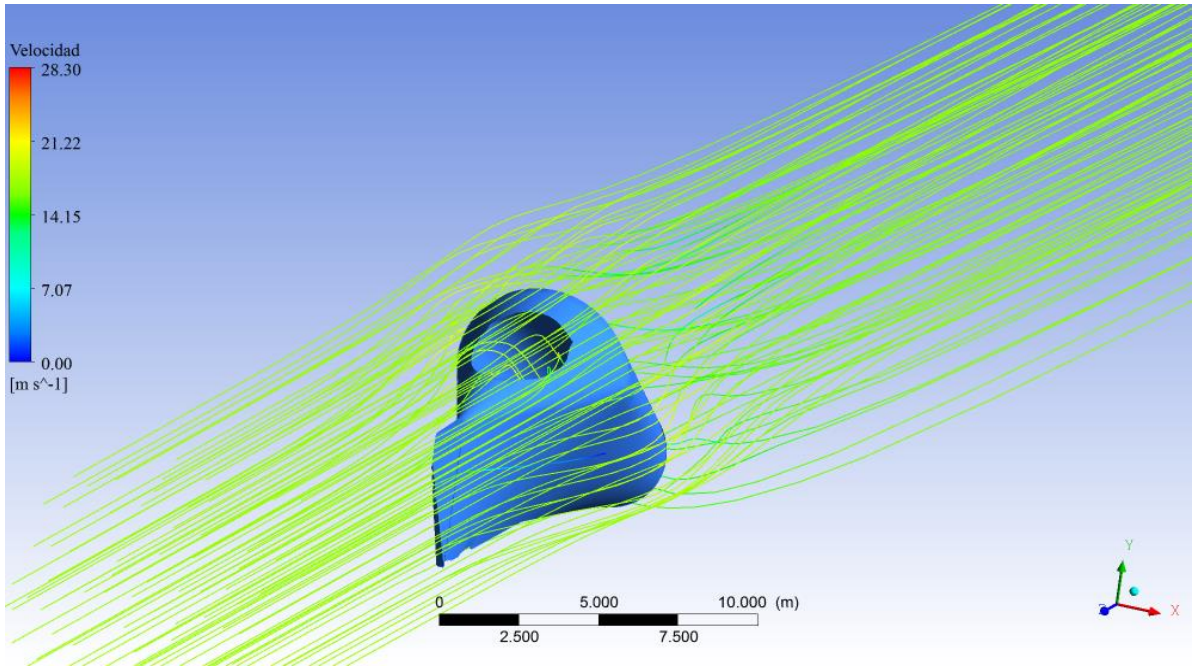


Figura IV.M7-9

Fuente: [EP]

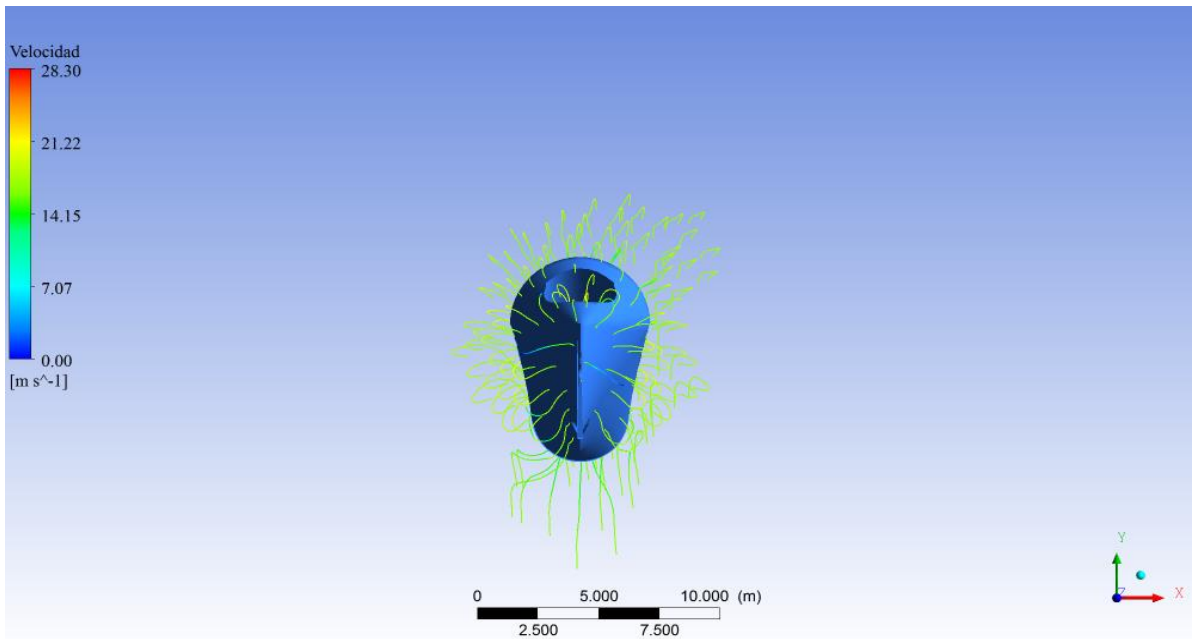


Figura IV.M7-10

Fuente: [EP]

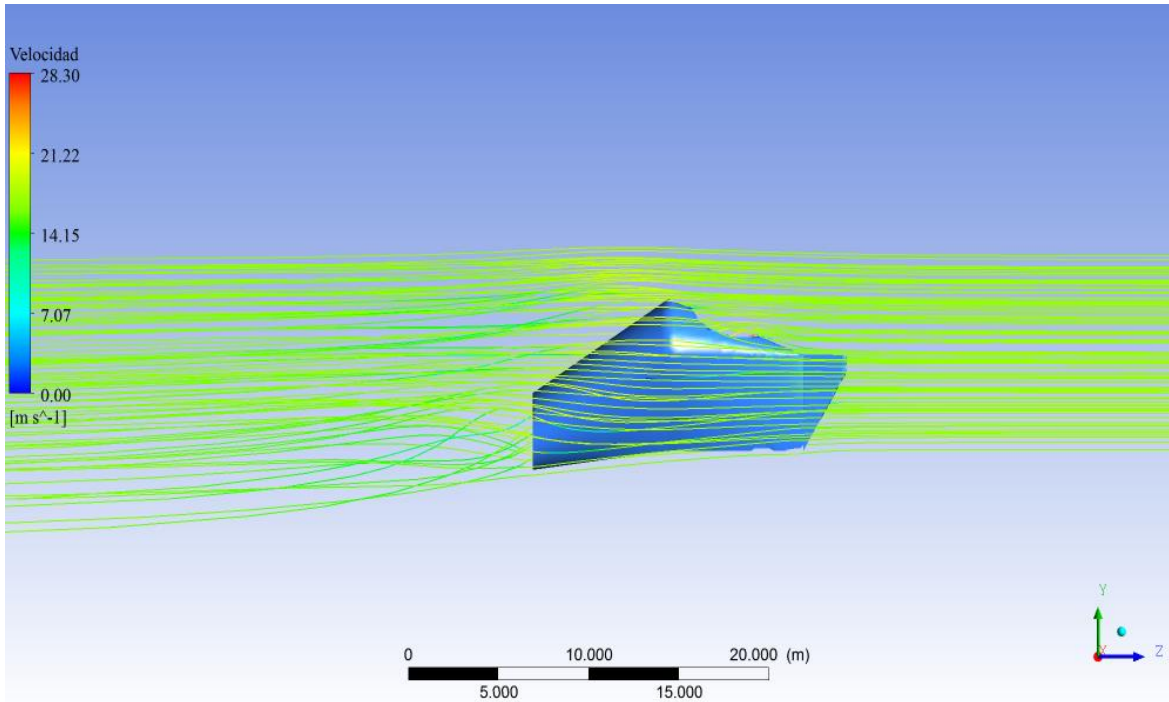


Figura IV.M7-II

Fuente: [EP]

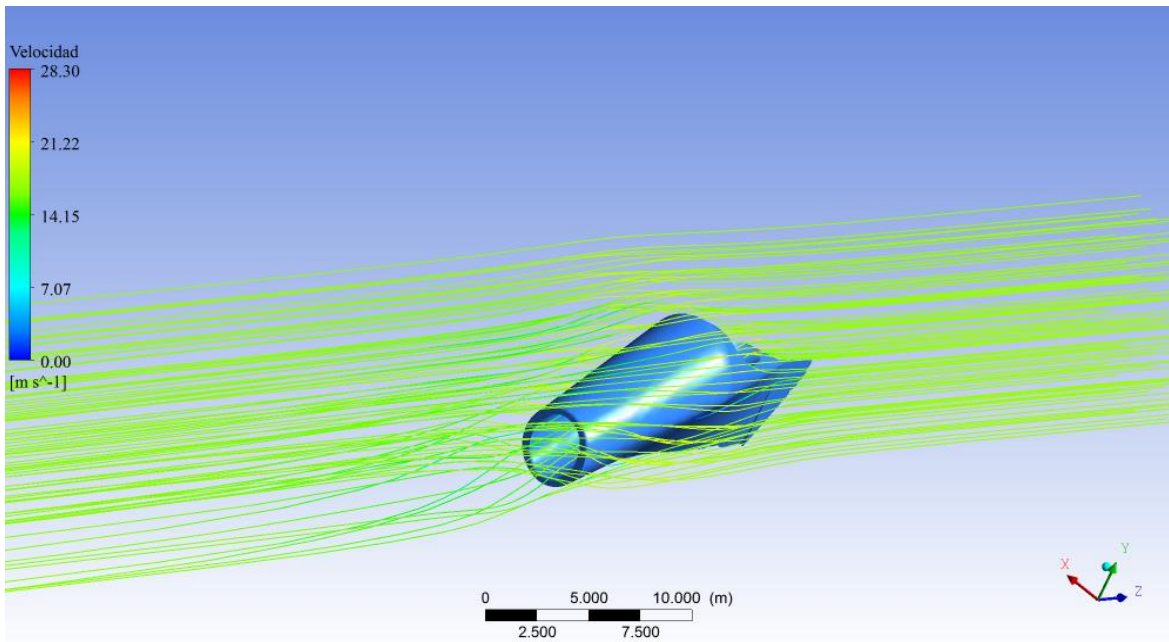


Figura IV.M7-12

Fuente: [EP]

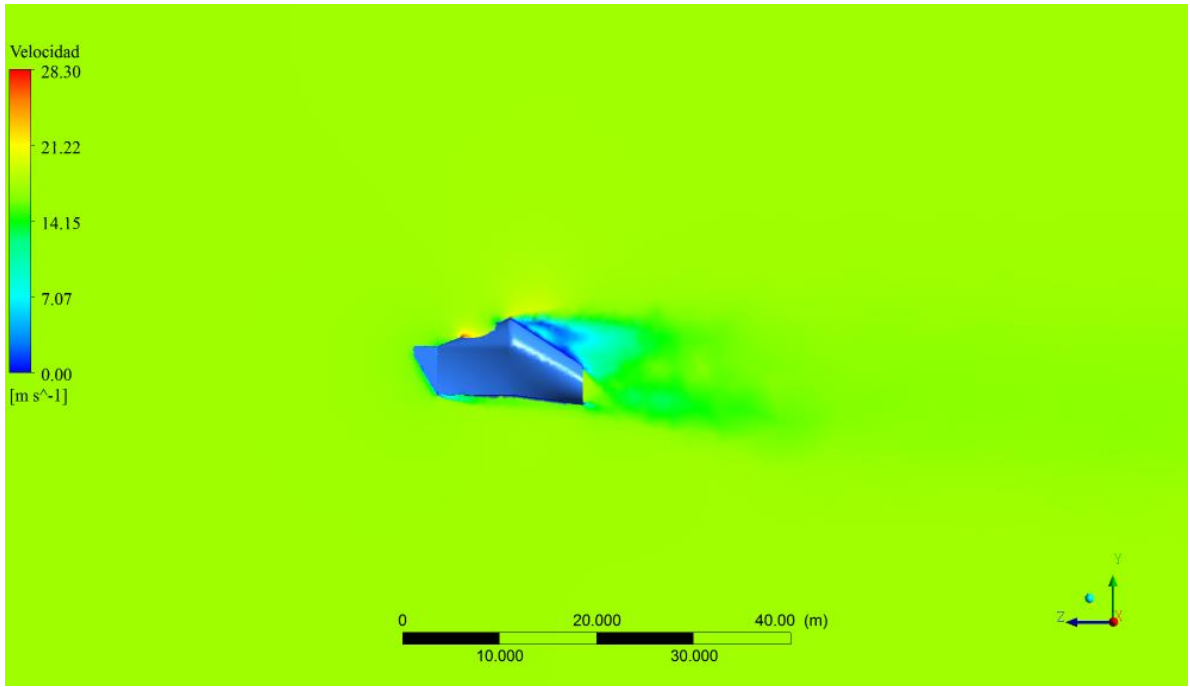


Figura IV.M7-13

Fuente: [EP]

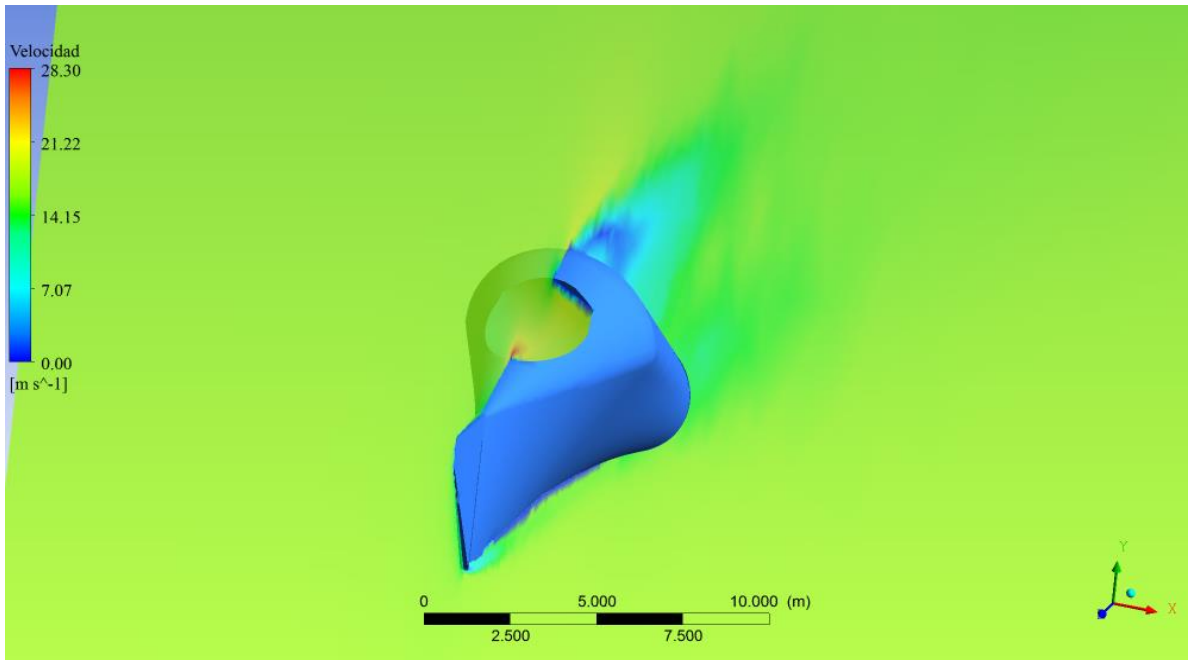


Figura IV.M7-14

Fuente: [EP]

En las figuras de las Streamline y planos anteriores vemos como continua manteniendo al igual que M6 la facilidad para el paso del agua a través del casco pero no tanto en el tubo donde la velocidad máxima se alcanza en la parte superior de la entrada y no en el interior del tubo donde se situaría la turbina.

El diseño M8 es el hermano pequeño del diseño definitivo M9 en el cual se ha tratado de aunar las ventajas del diseño M5 con las del diseño M7. La entrada de este diseño ya cuenta con los 5 metros de diámetro que se comentaron anteriormente y en general con unas dimensiones algo más estilizadas y depuradas que los primeros diseños garantizando la estabilidad y flotabilidad así como consiguiendo una buena optimización en lo que a conducción del agua se refiere. Podemos observar que los pontones laterales recuerdan al diseño M7 por su forma de casco de barco y la parte interior de los pontones al M5 por la forma de conducir el agua hacia el tubo. También incorpora el timón fijo para poder orientarse de forma automática. En cuanto a la forma exterior se sigue la idea del diseño M5 intentando ser lo más suave posible para producir el menor arrastre posible.



Figura IV.M8-1

Fuente: [EP]



Figura IV.M8-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M8-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M8-4

Fuente: [EP]



Figura IV.M8-5

Fuente: [EP]

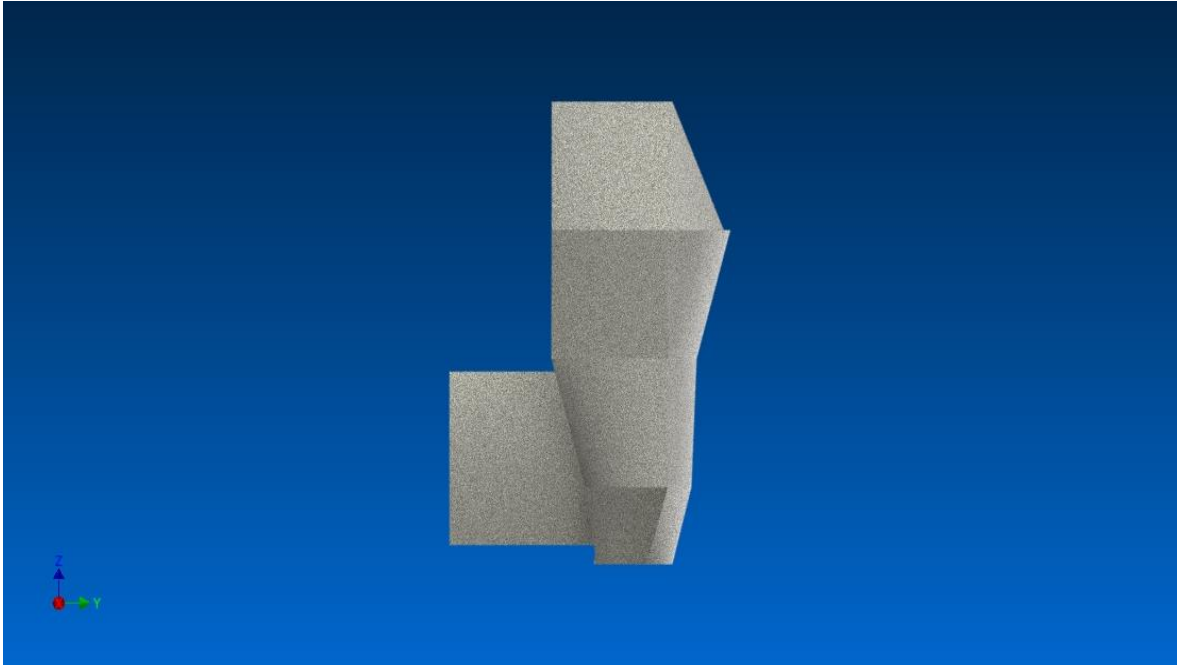


Figura IV.M8-6

Fuente: [EP]

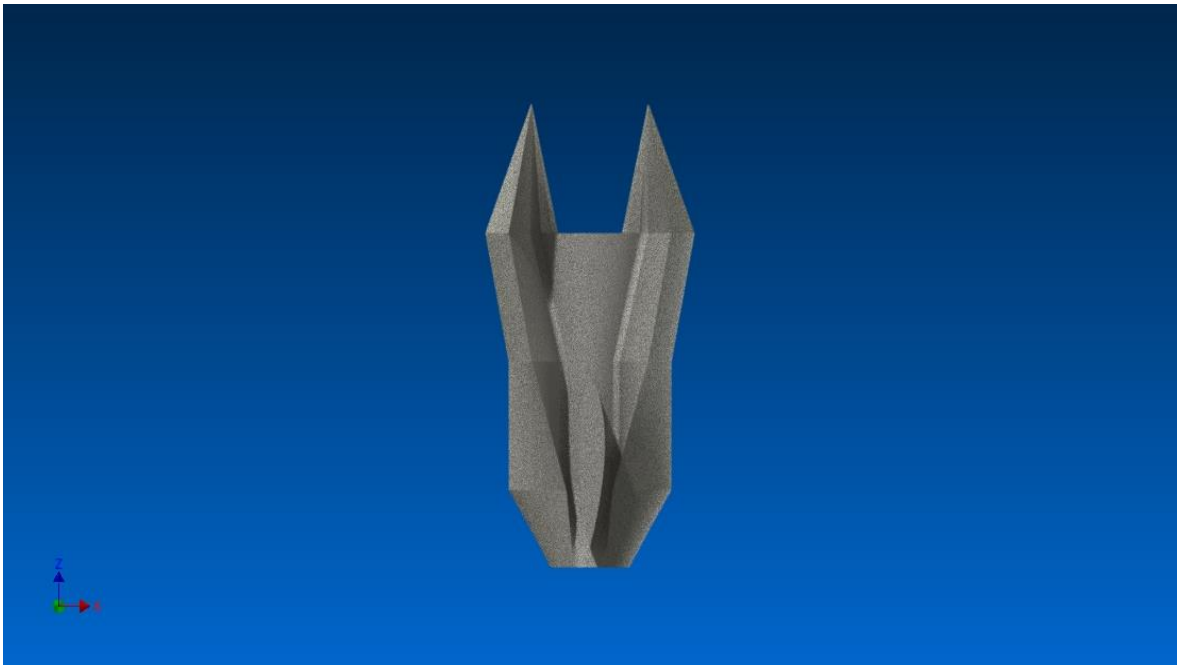


Figura IV.M8-7

Fuente: [EP]

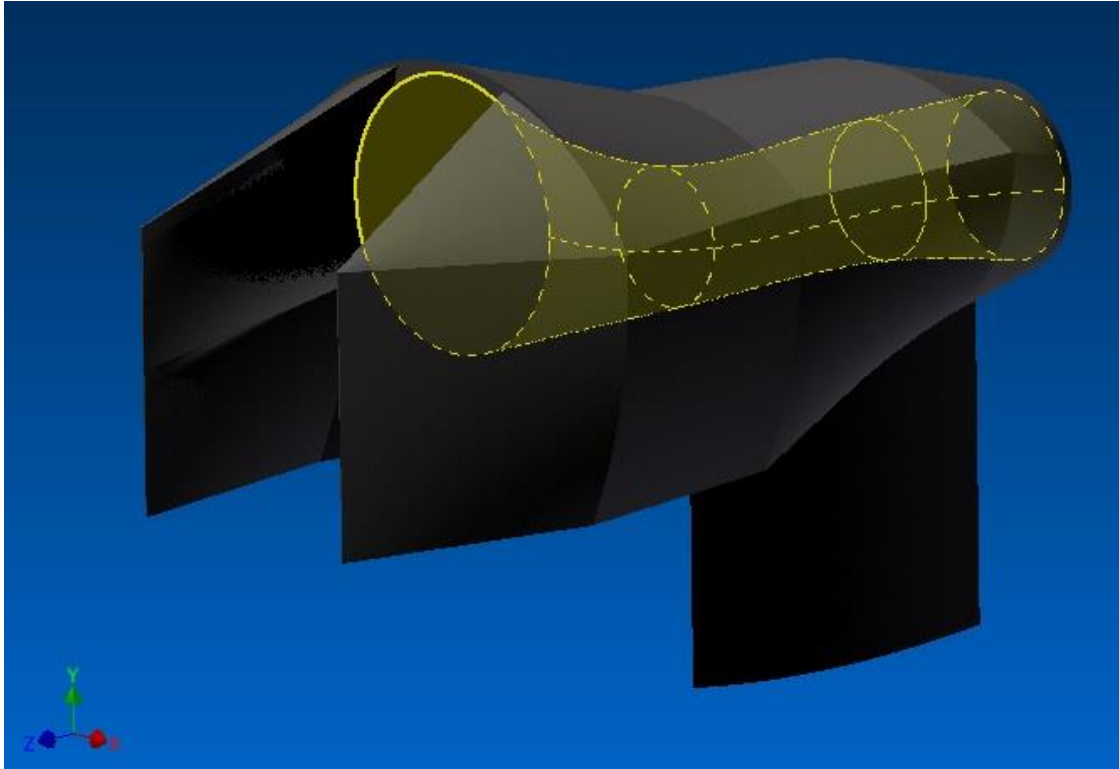


Figura IV.M8-8

Fuente: [EP]

En la figura anterior se observa la forma del tubo donde se situará la turbina, se aprecia que tiene una transición más suave que los diseños M5 y anteriores debido principalmente a la reducción de diámetro de entrada del diseño, esto favorecerá que la velocidad interior del tubo en la zona de la turbina sea inferior a aquella en la que empieza a aparecer el fenómeno de la cavitación.

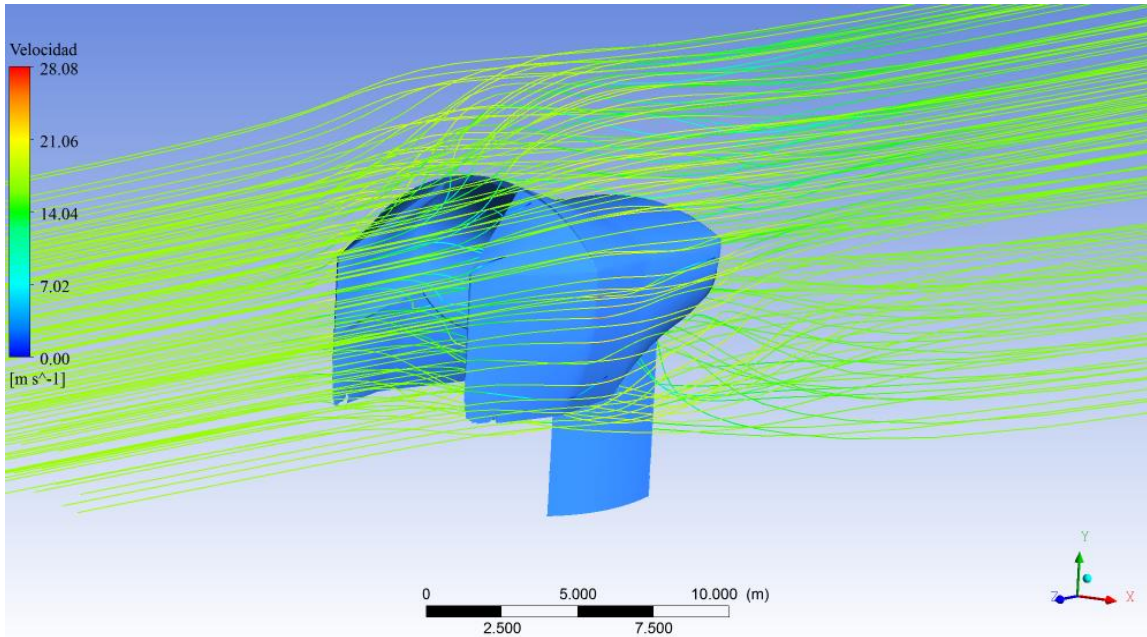


Figura IV.M8-9

Fuente: [EP]

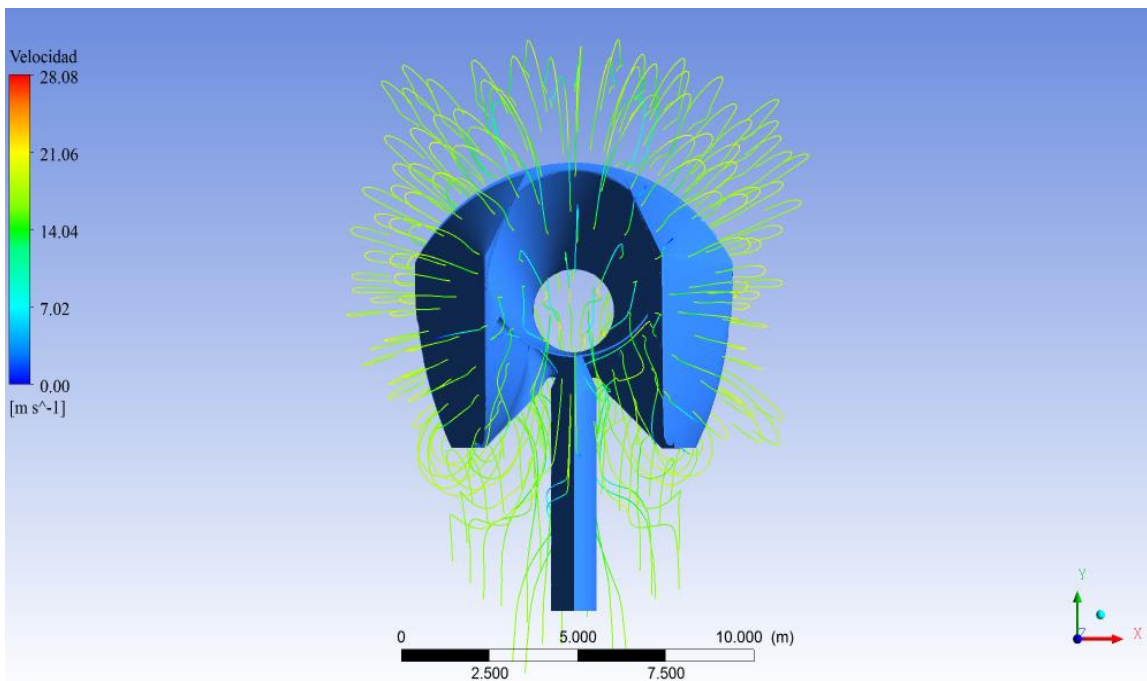


Figura IV.M8-10

Fuente: [EP]

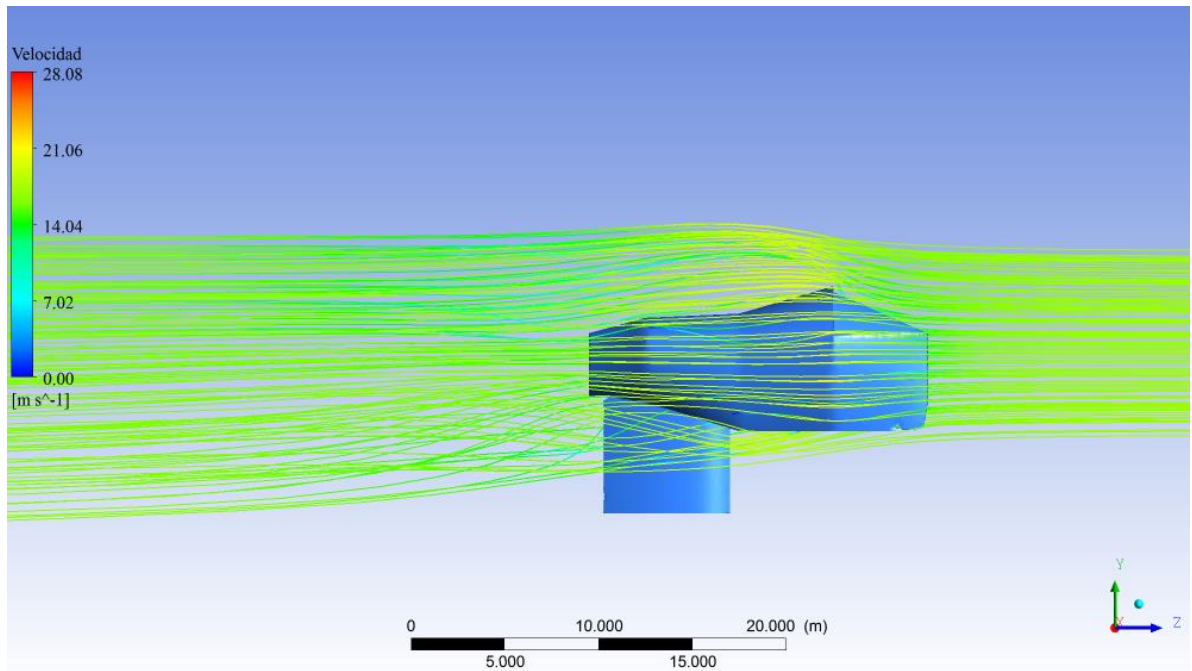


Figura IV.M8-II

Fuente: [EP]

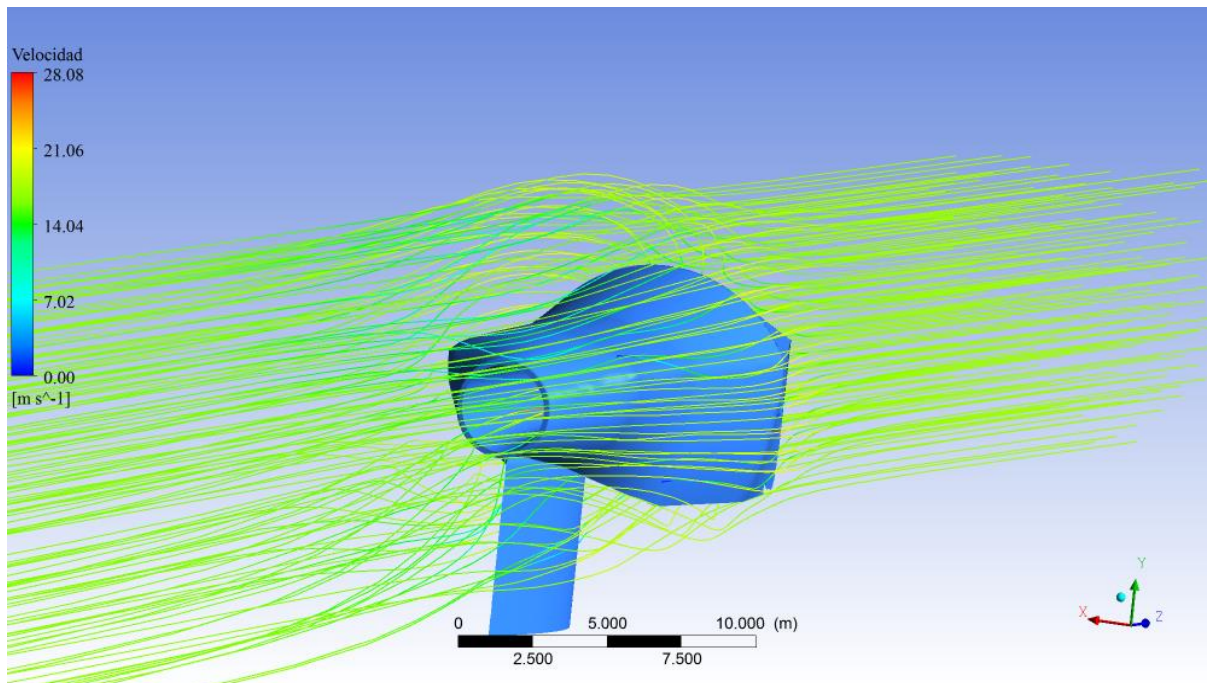


Figura IV.M8-I2

Fuente: [EP]

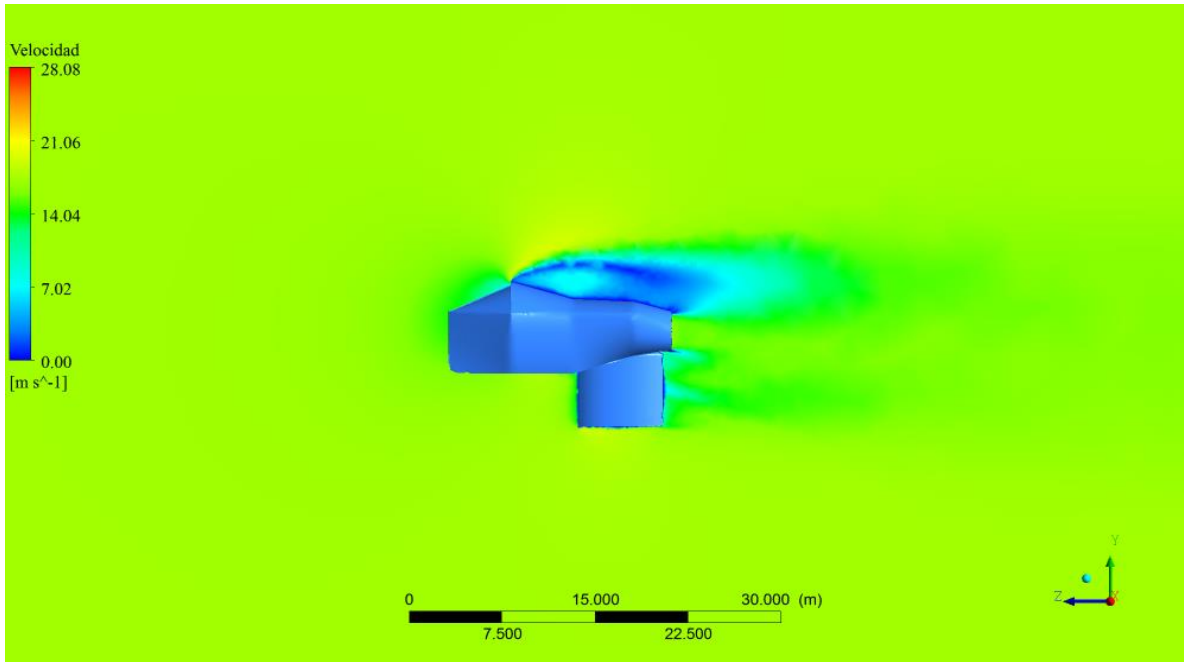


Figura IV.M8-13

Fuente: [EP]

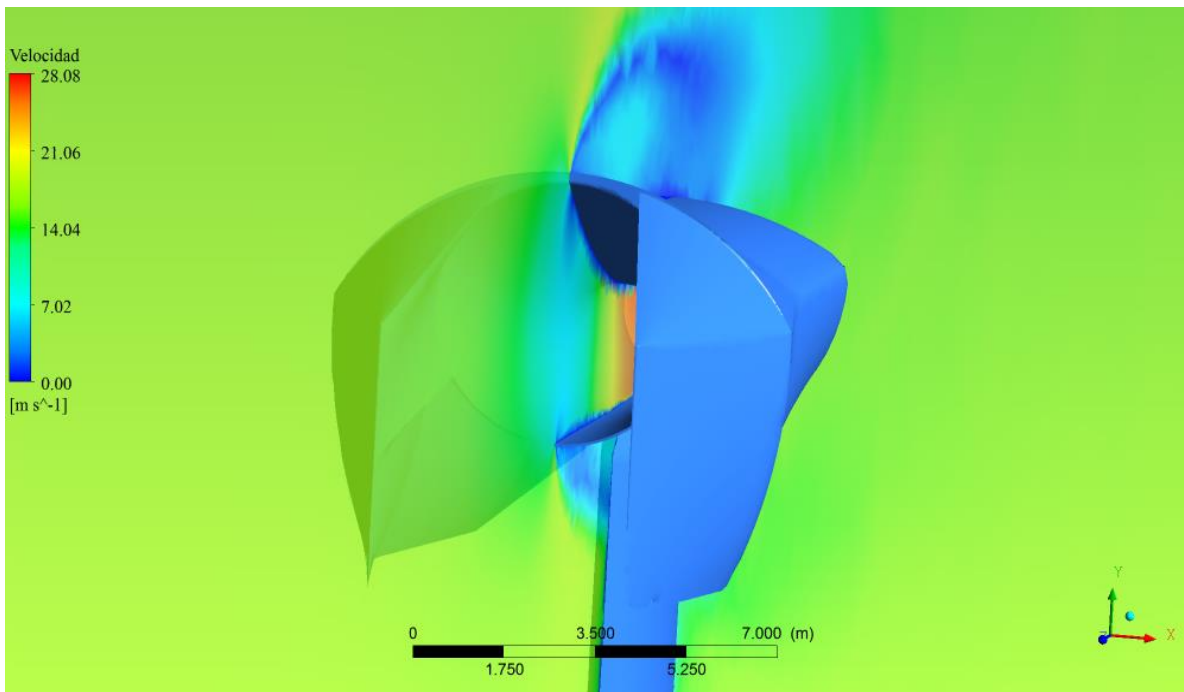


Figura IV.M8-14

Fuente: [EP]

En las Streamline y planos anteriores vemos como en este diseño aparecen recirculaciones de agua muy pequeñas a diferencia de los diseños M5 y anteriores, esto reduce el arrastre al paso de la ola, además de encauzar el agua de forma más eficiente que el diseño M7. Con lo cual este diseño ya se podría considerar que cumple las hipótesis previas de forma bastante eficiente.

El último diseño, M9, es similar al M8 salvo en que las quillas de los pontones laterales que antes eran verticales ahora se han desdoblado en dos quillas para un mismo pontón, una posterior y más grande para dar estabilidad flotabilidad y otra delantera y más pequeña con la intención de cortar la ola de la manera más eficiente posible son el fin de conseguir combinar las ventajas de los grandes pontones y de las quillas estrechas. En esta doble quilla aparece una superficie entre las dos quillas de cada pontón que tiene la ventaja de estabilizar el diseño al paso de las olas debido a que aunque tiene el balanceo limitado por la hipótesis cuatro puede que en algún momento de temporal el diseño pueda cabecear debido a la gran altura de las olas y es aquí donde esta superficie entre quillas impide que el diseño se introduzca demasiado en el agua por este movimiento como si ocurriría con las quillas verticales simples.

En cuanto a la forma de "v" del diseño M5 se ha evolucionado hacia una forma de "c" en cada parte inferior de los pontones como se ve en (Figura IV.M9-17) realizada así con la misma intención que en los diseños M5 y anteriores pero adaptándola a la geometría de este diseño.

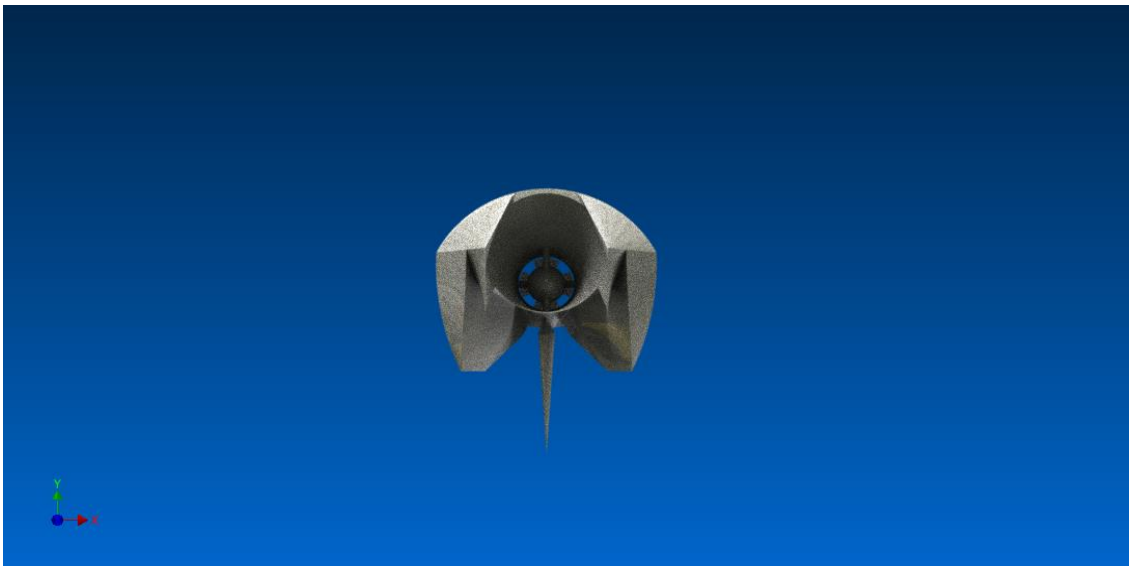


Figura IV.M9-1

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-2

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-3

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-4

Fuente: [EP]

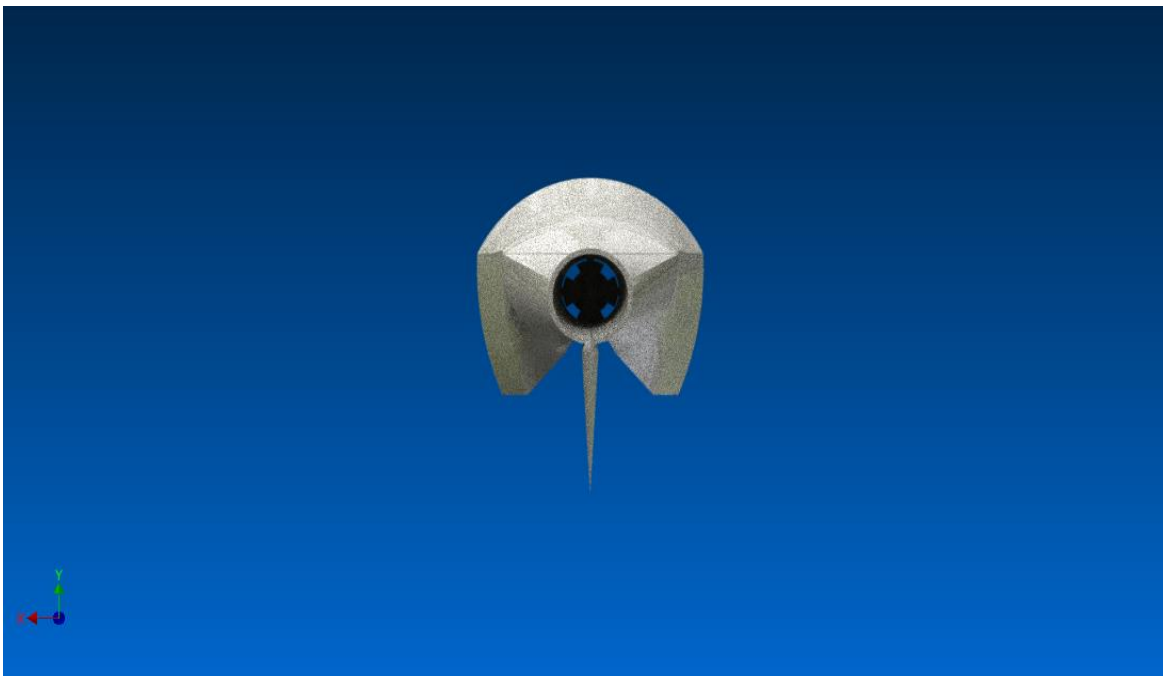


Figura IV.M9-5

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-6

Fuente: [EP]

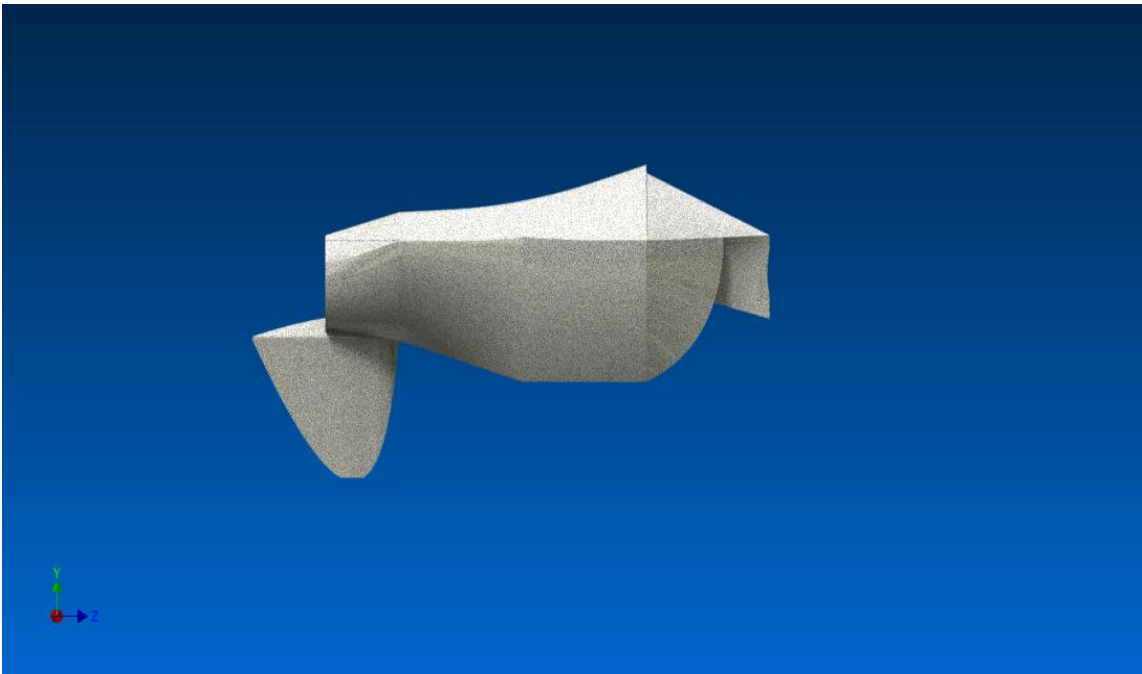


Figura IV.M9-7

Fuente: [EP]

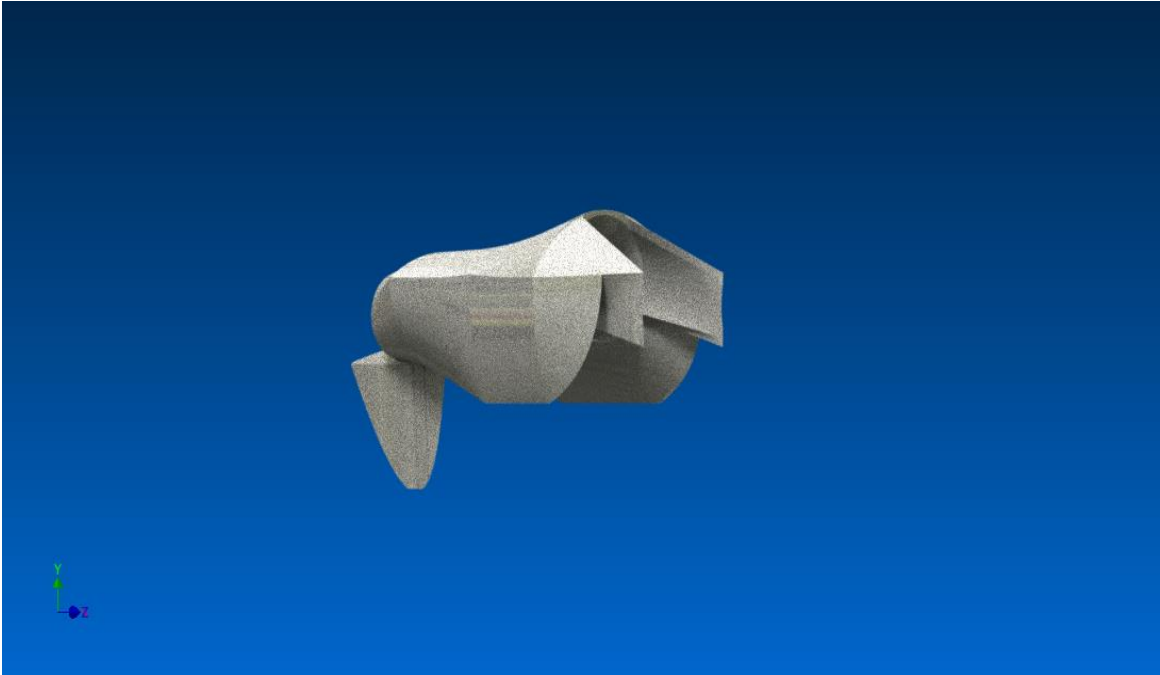


Figura IV.M9-8

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-9

Fuente: [EP]



Figura IV.M9-10

Fuente: [EP]

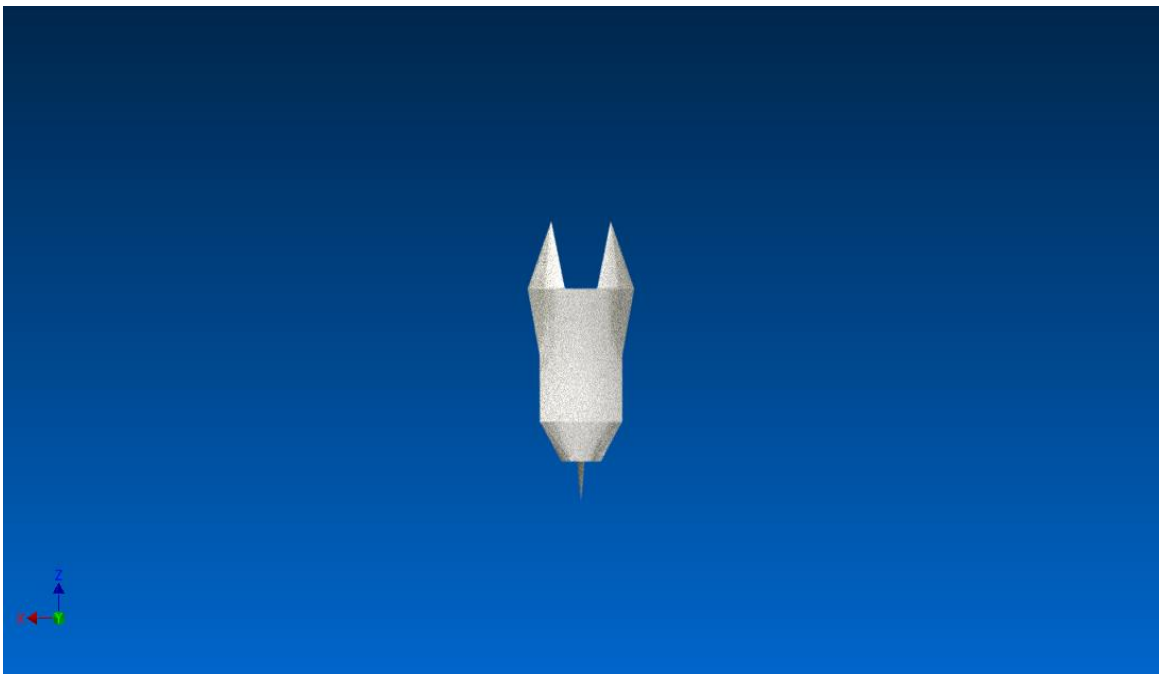


Figura IV.M9-II

Fuente: [EP]

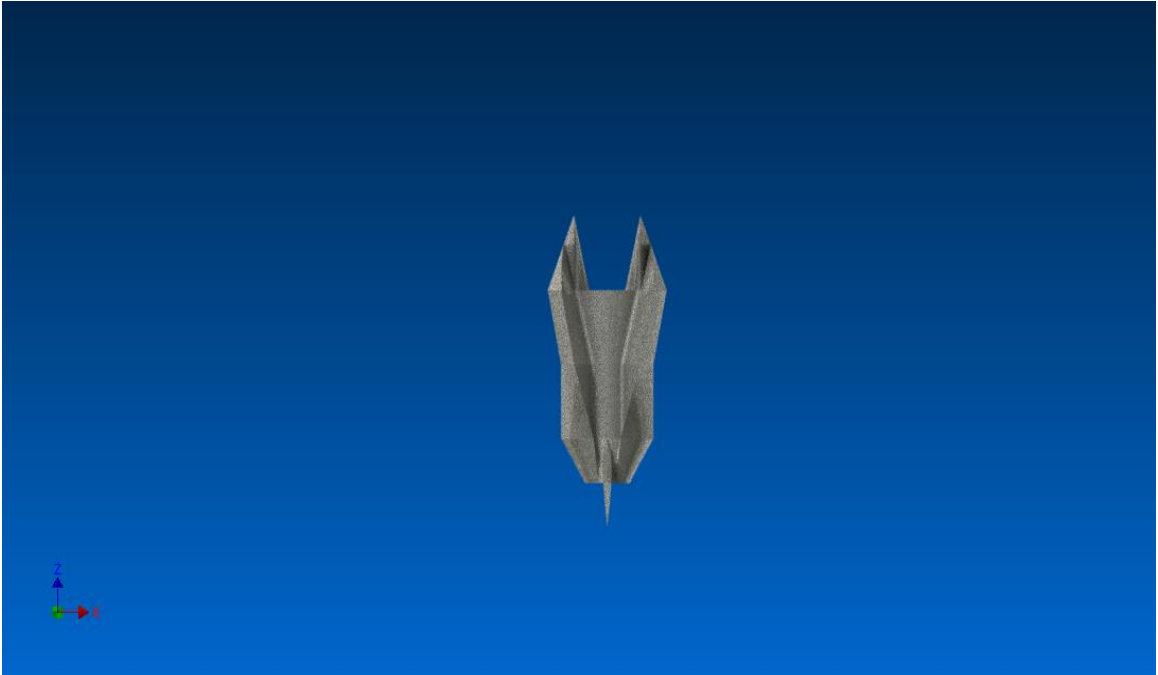


Figura IV.M9-12

Fuente: [EP]

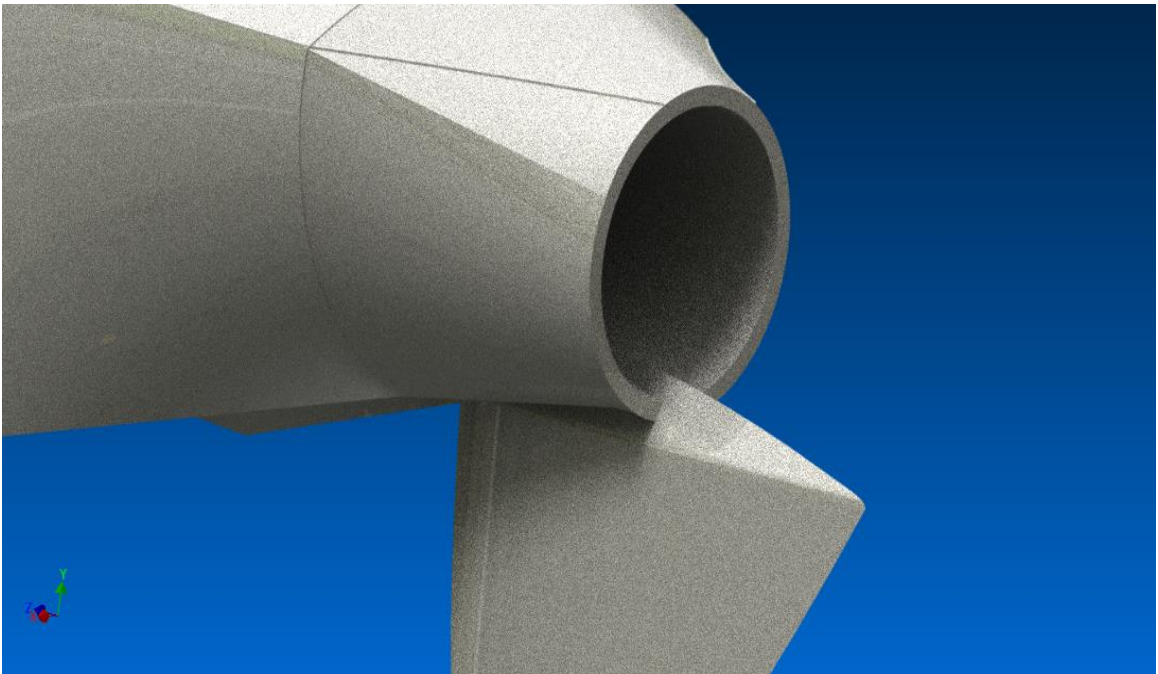


Figura IV.M9-13

Fuente: [EP]

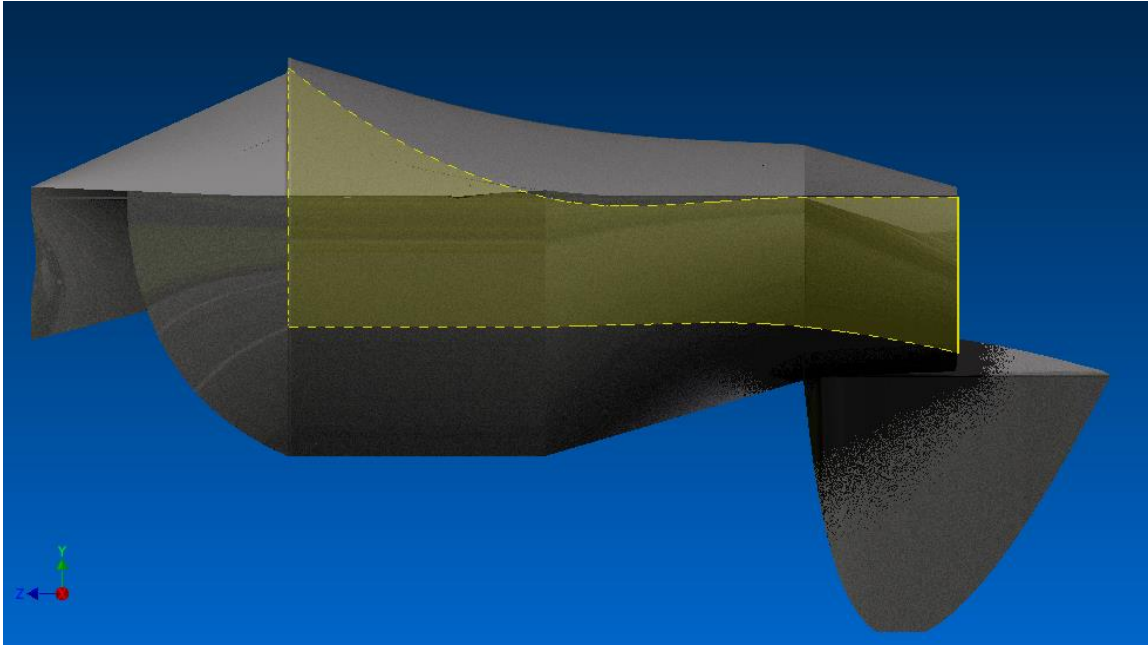


Figura IV.M9-14

Fuente: [EP]

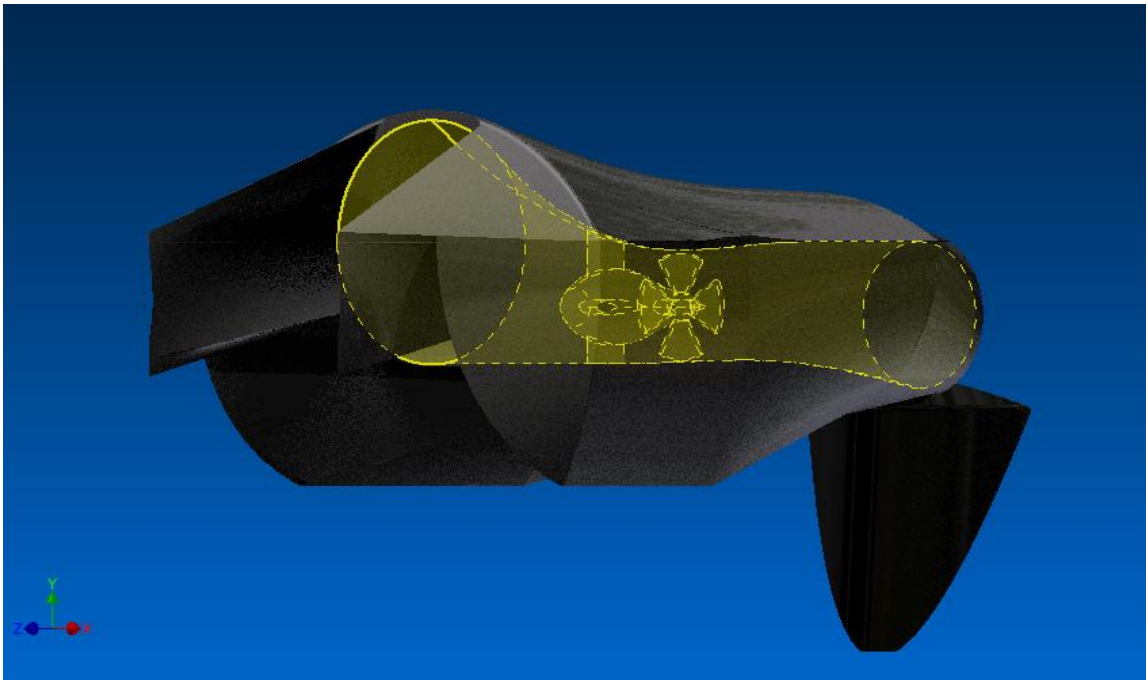


Figura IV.M9-15

Fuente: [EP]

En estas dos figuras anteriores vemos la forma del tubo, es idéntica a la del modelo M8, y se le incorpora un modelo teórico de turbina bulbo, por ser esta la que mejor se adapta a las condiciones hidráulicas de este diseño, baja altura de trabajo con caudales medios a moderados.

En la siguiente figura se observa como el centro de gravedad se ha hecho coincidir con el bulbo de la turbina para así limitar las tensiones en la estructura que crean tanto el flujo del agua a través del tubo como las propias olas en su movimiento oscilatorio. También puede observarse el gran tamaño del timón trasero que además de cumplir su función de orientar al diseño al paso de las olas actúa compensando la masa delantera y centrando la localización del centro de gravedad.

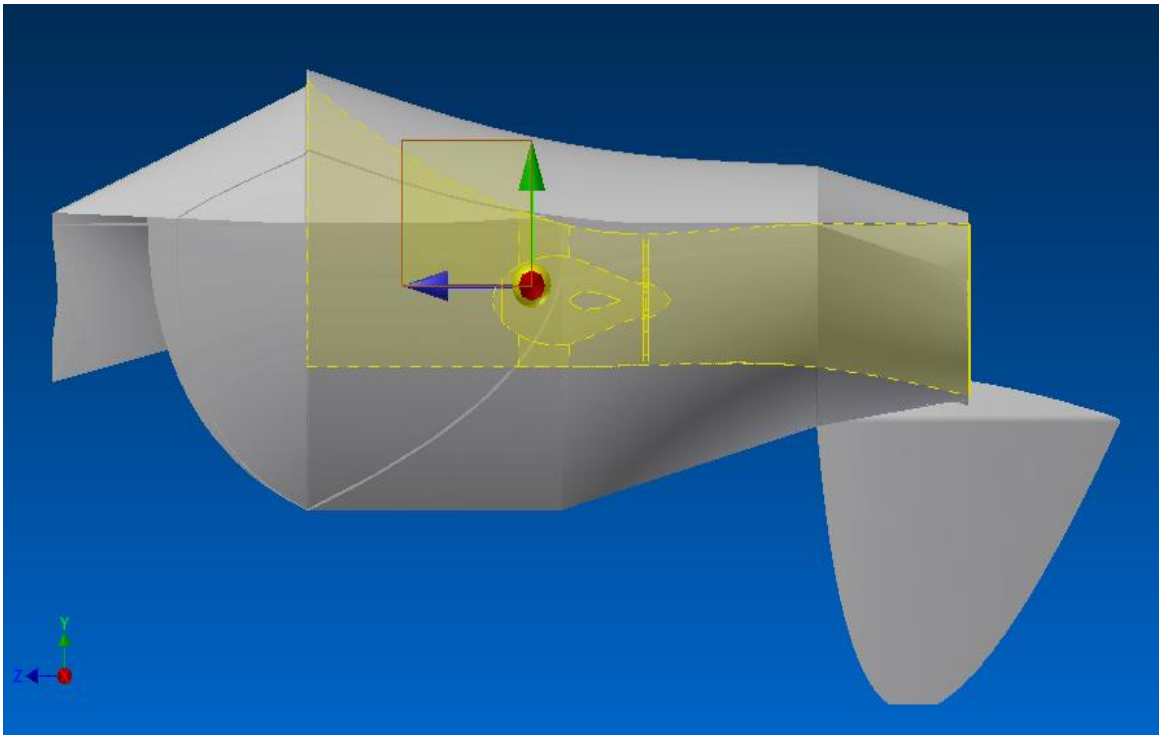


Figura IV.M9-16

Fuente: [EP]

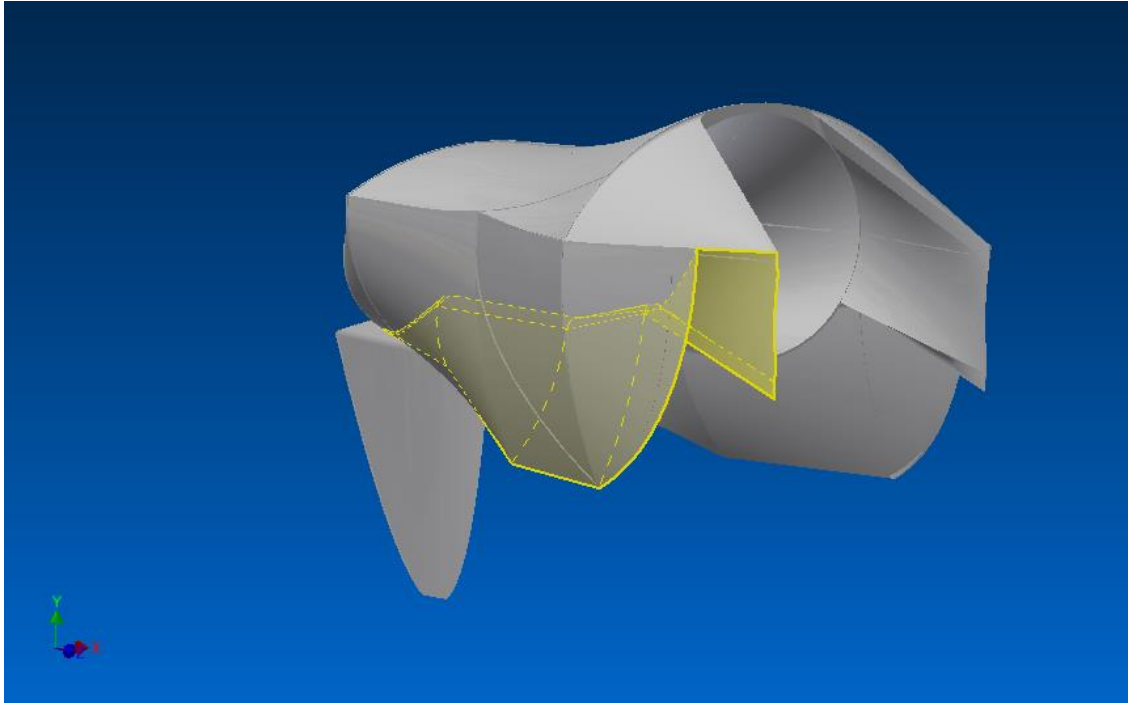


Figura IV.M9-17

Fuente: [EP]

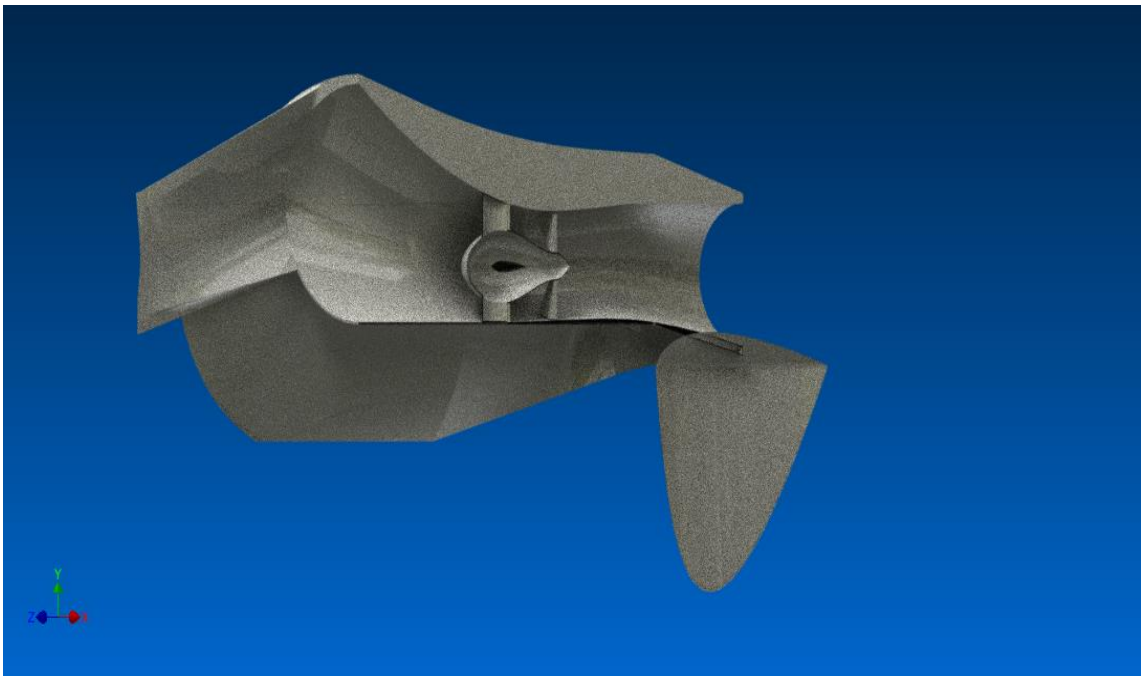


Figura IV.M9-18

Fuente: [EP]

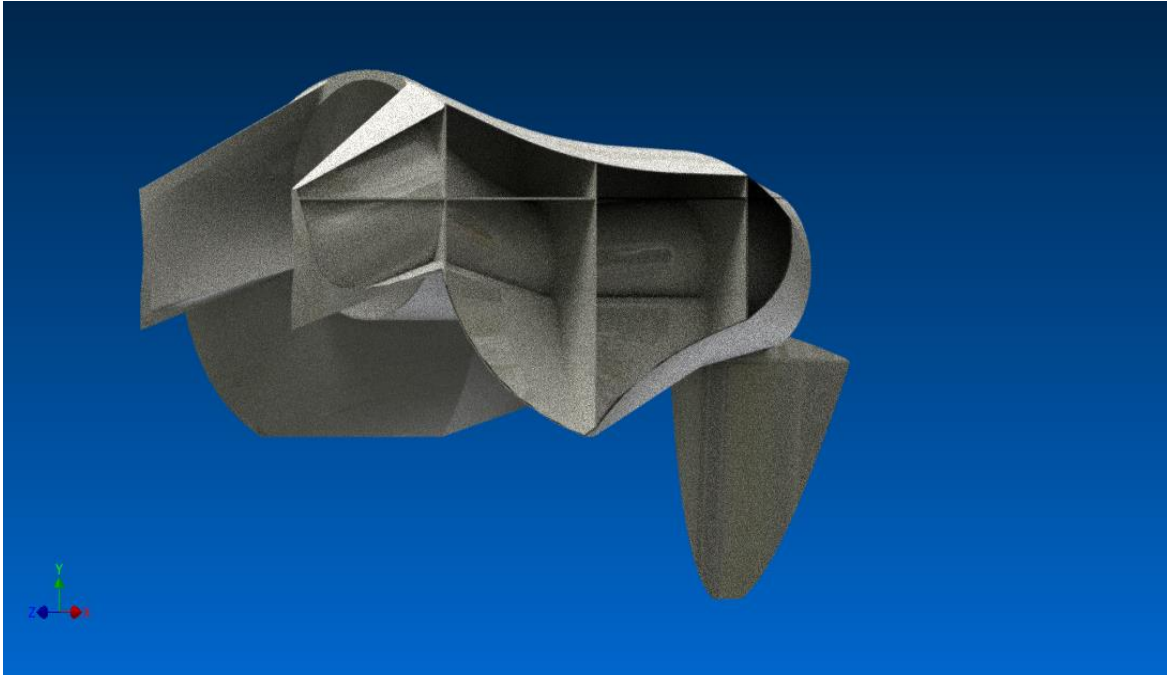


Figura IV.M9-19

Fuente: [EP]

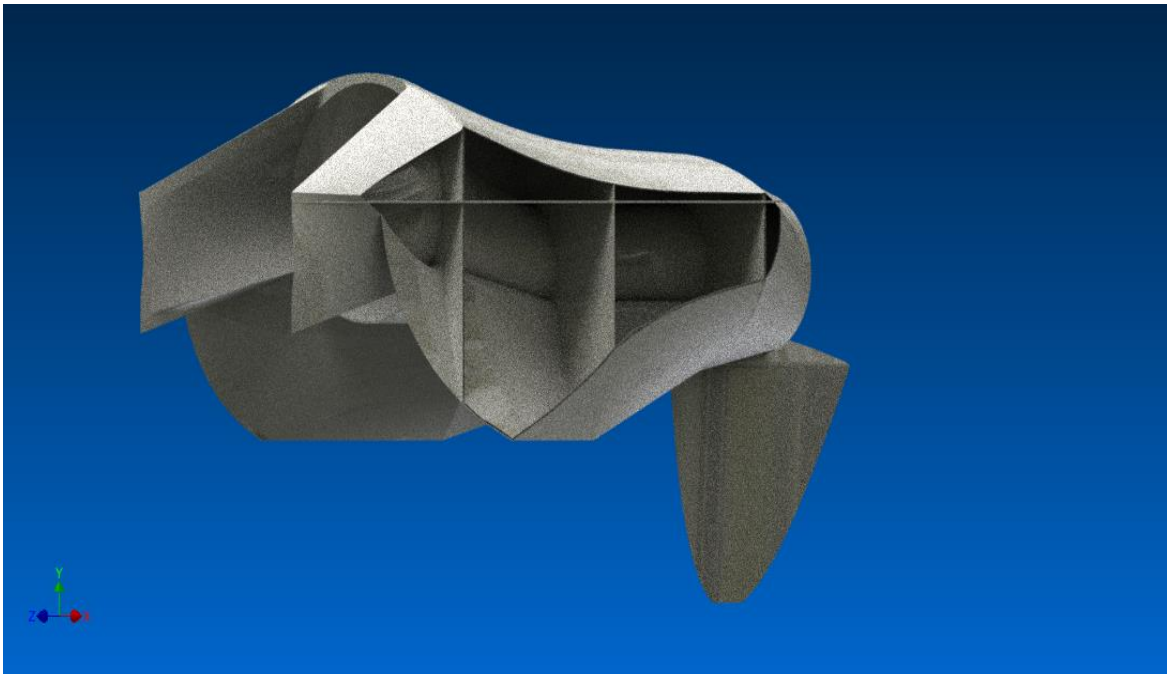


Figura IV.M9-20

Fuente: [EP]

Estas tres anteriores figuras muestran secciones de la estructura interna del diseño, la cual posteriormente se comentará.

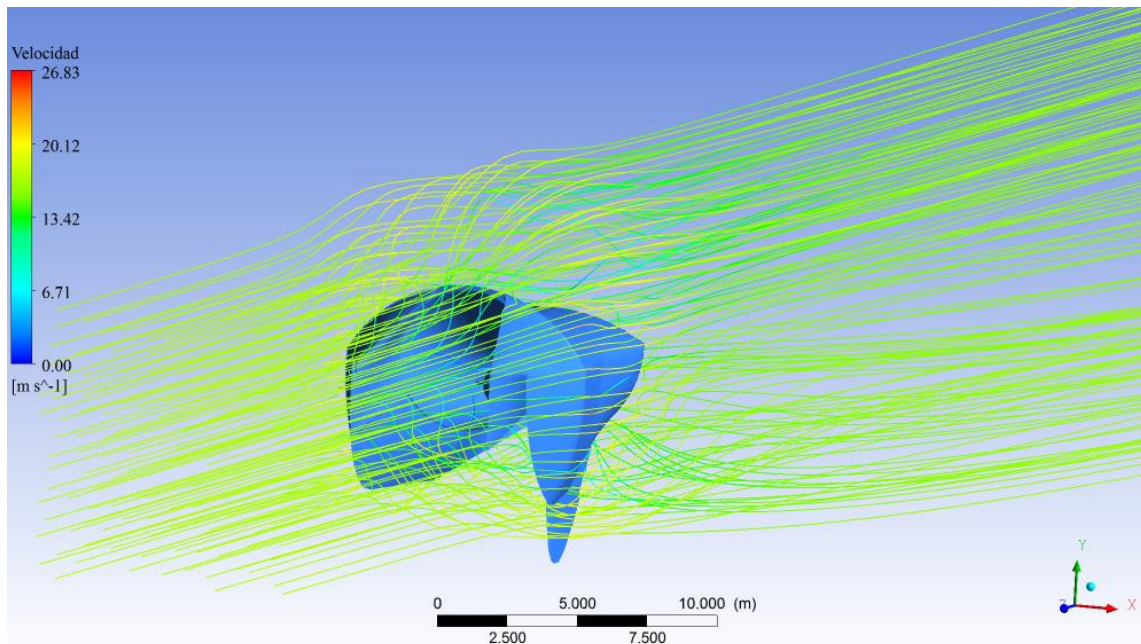


Figura IV.M9-25

Fuente: [EP]

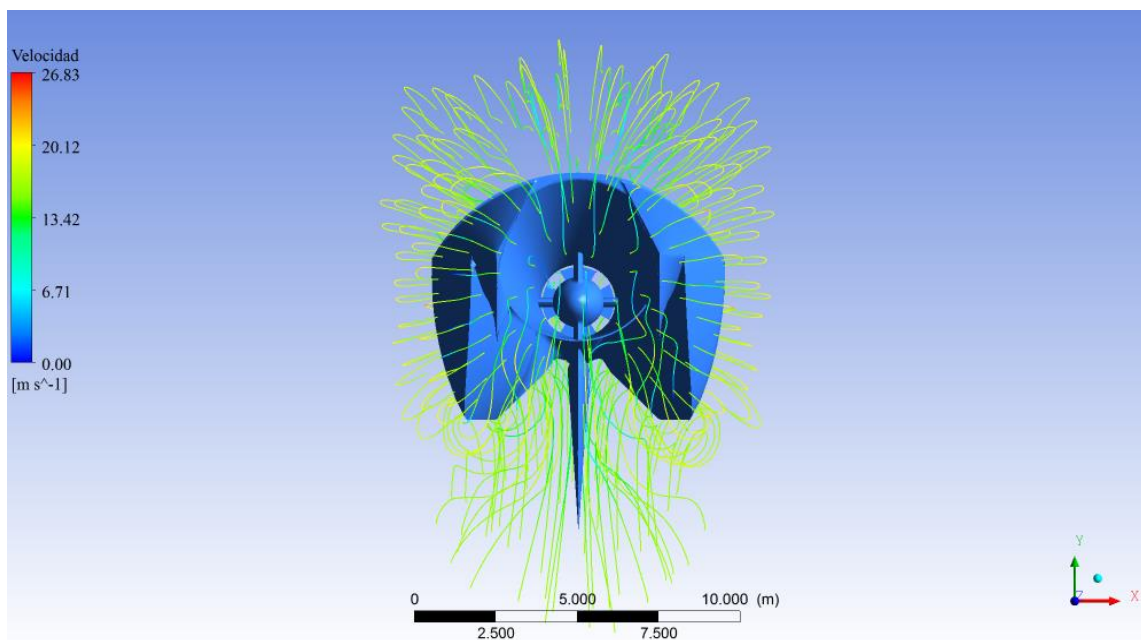


Figura IV.M9-26

Fuente: [EP]

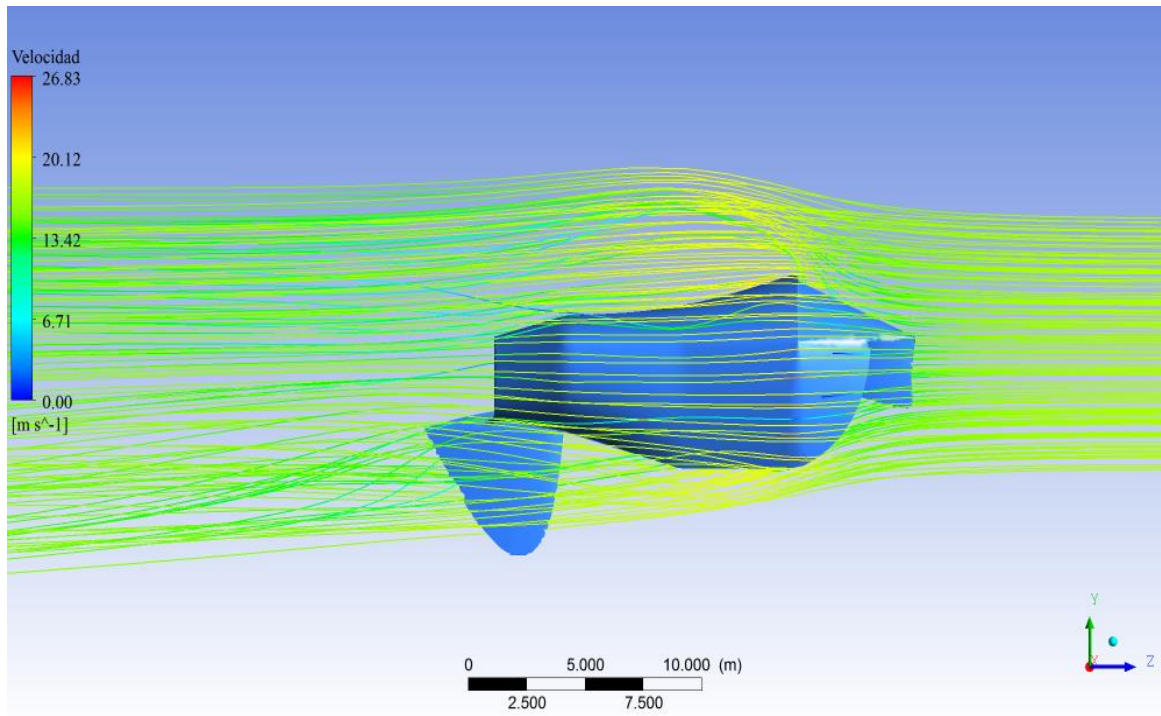


Figura IV.M9-27

Fuente: [EP]

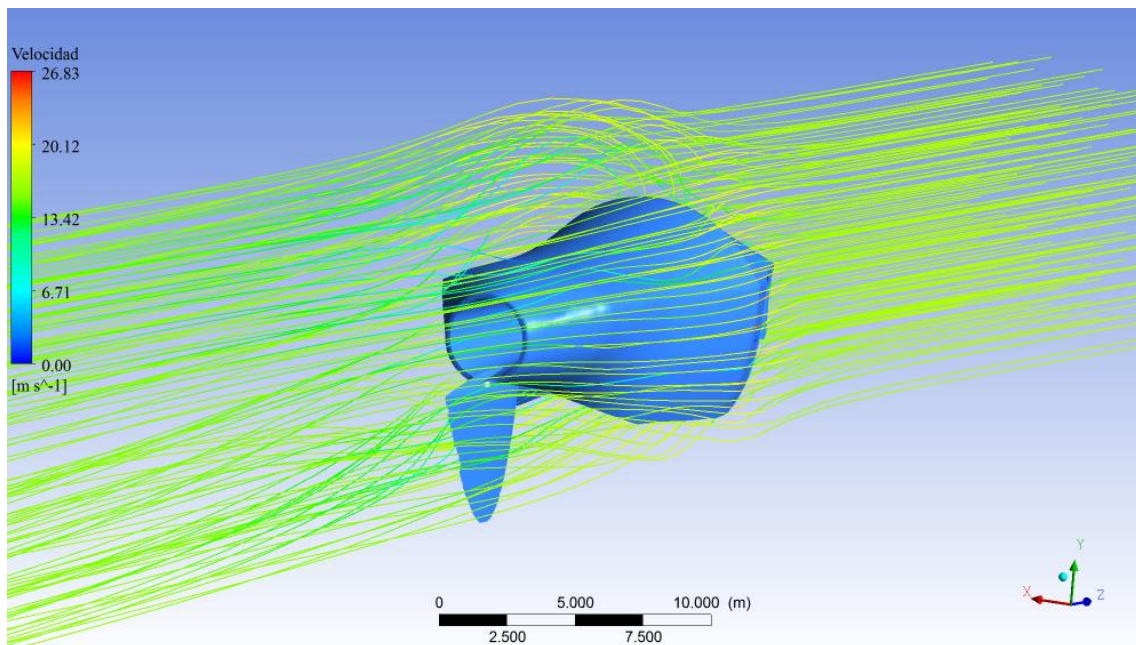


Figura IV.M9-28

Fuente: [EP]

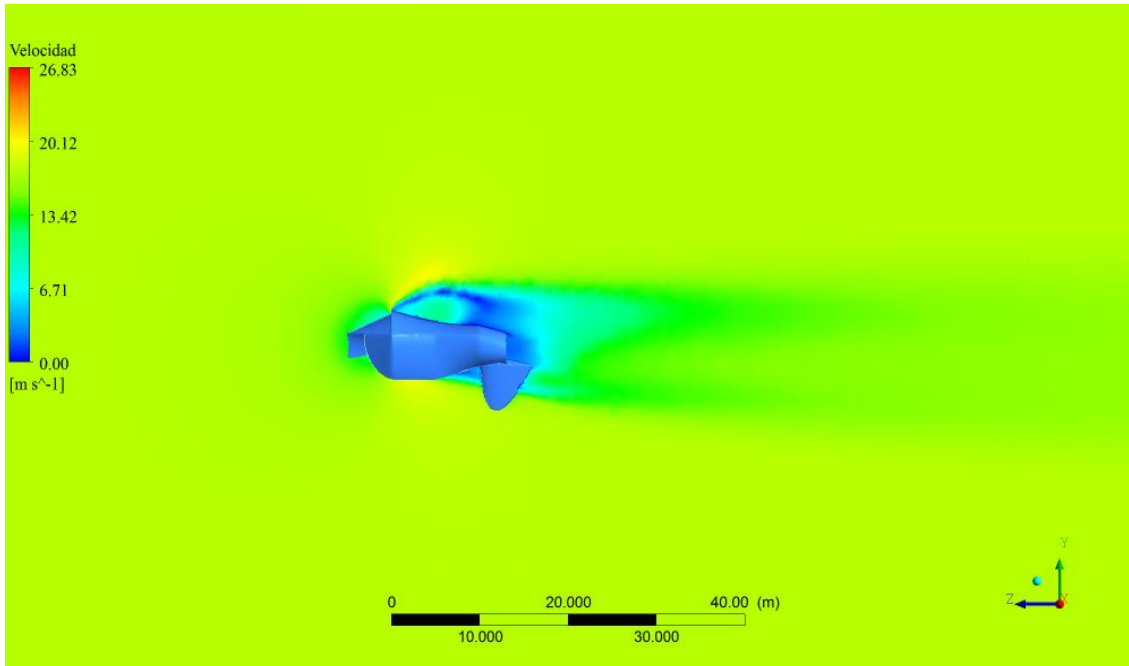


Figura IV.M9-29

Fuente: [EP]

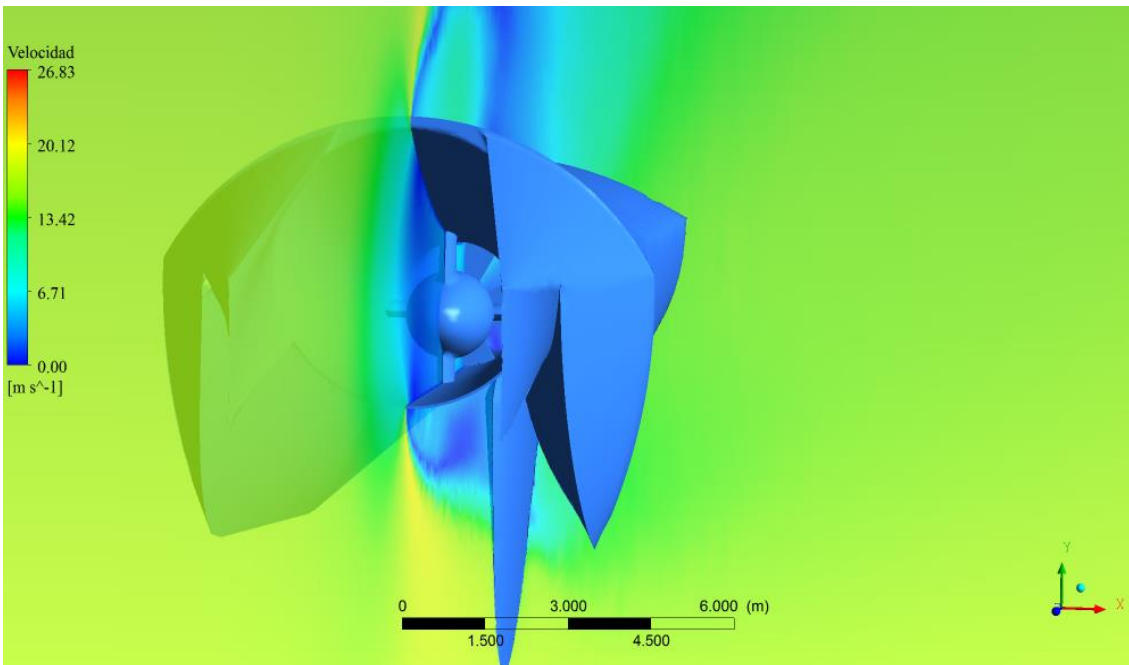


Figura IV.M9-30

Fuente: [EP]

En las Streamline y planos anteriores vemos como en este diseño al igual que el M8 aparecen recirculaciones de agua muy pequeñas a diferencia de los diseños M5 y anteriores, esto reduce el arrastre al paso de la ola, además de encauzar el agua de forma más eficiente que el diseño M7. Además se observa como la superficie entre la doble quilla cumple una función adicional que es la de conducir el agua hacia la "c" de cada pontón para que en la parte final ayude a salir al agua que circula por el interior del tubo.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE DISEÑO DEFINITIVO

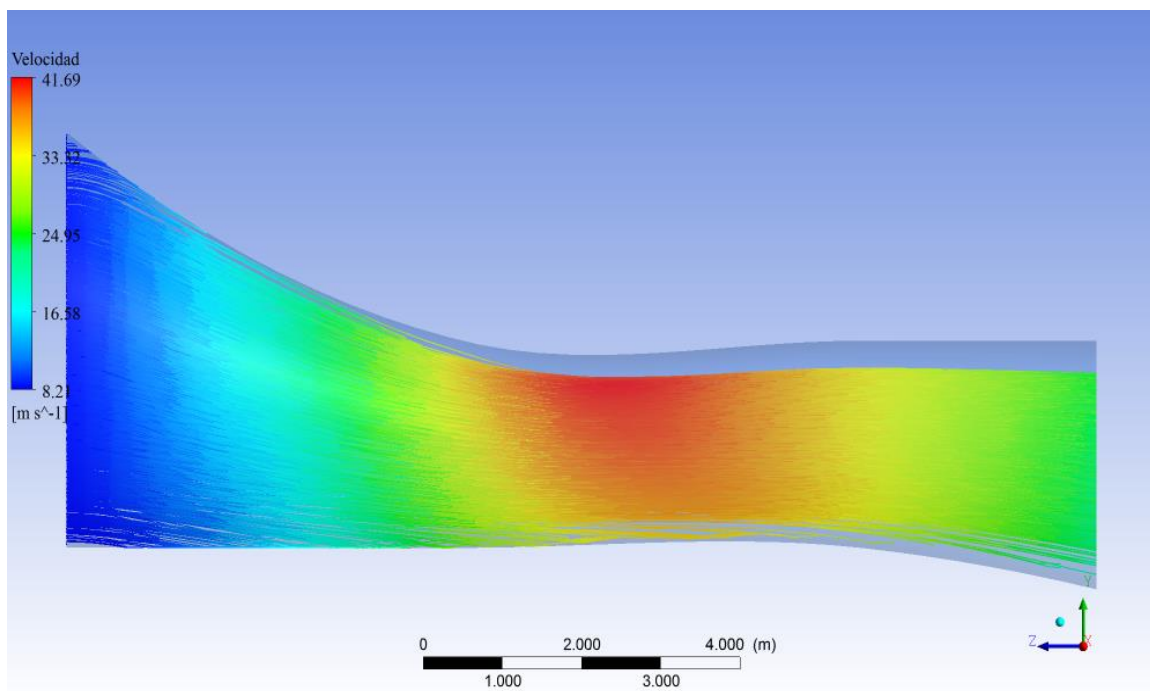


Figura IV.3

Fuente: [EP]

En la figura anterior podemos observar el comportamiento de las líneas de corriente del interior del tubo del diseño definitivo de forma aislada, es decir considerando únicamente el tubo para un cálculo hidráulico como si de una tubería convencional se tratase, sin tener en cuenta la turbina ni el oleaje. Tiene la entrada de agua en la parte izquierda, la de mayor sección, y vemos cómo va estrechándose y aumentando la velocidad del agua, en la zona de máxima velocidad es donde estará situada la turbina, y en la parte final se aumenta la sección para y reducir los esfuerzos que crea este aumento de la velocidad en la estructura.

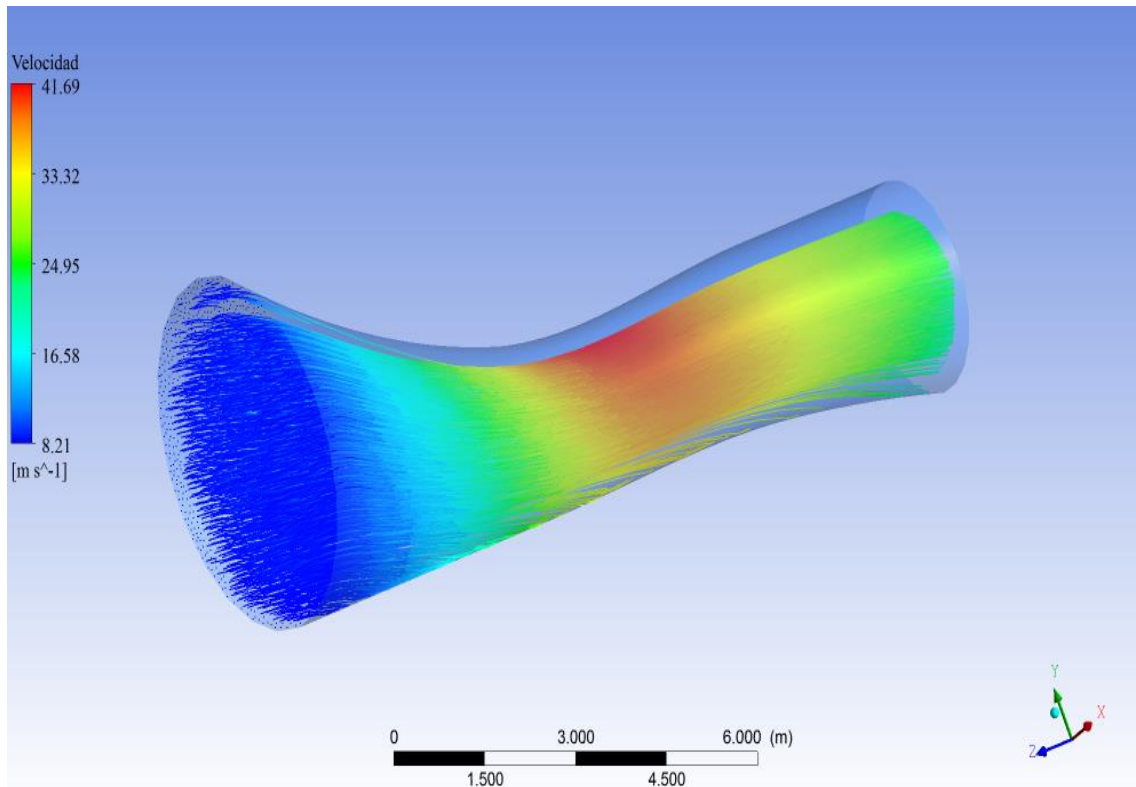


Figura IV.4

Fuente: [EP]

CAPITULO V

CÁLCULO ESTRUCTURAL

CÁLCULO DE SOLICITACIONES

Empleando el programa Fluent modelizando la ola que posee la combinación de las características máximas de todas las olas del punto más energético es decir altura de ola 12.1 metros y longitud de ola 743 metros parámetros necesarios por el programa han resultado las siguientes presiones:

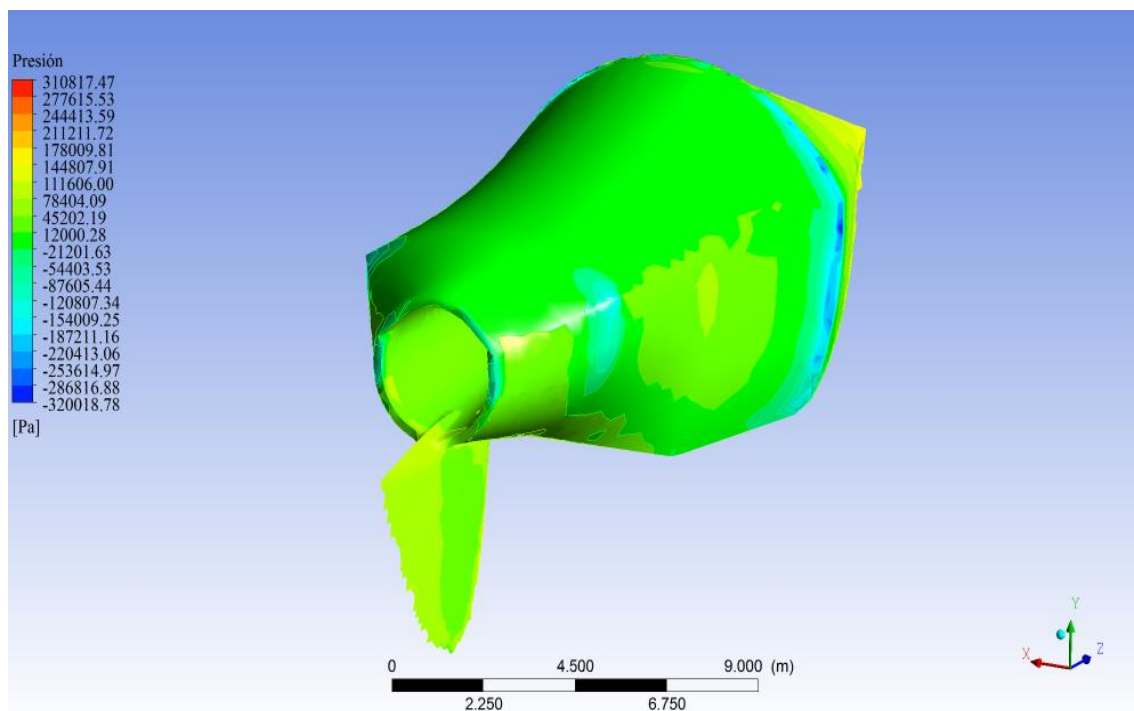


Figura V.1

Fuente: [EP]

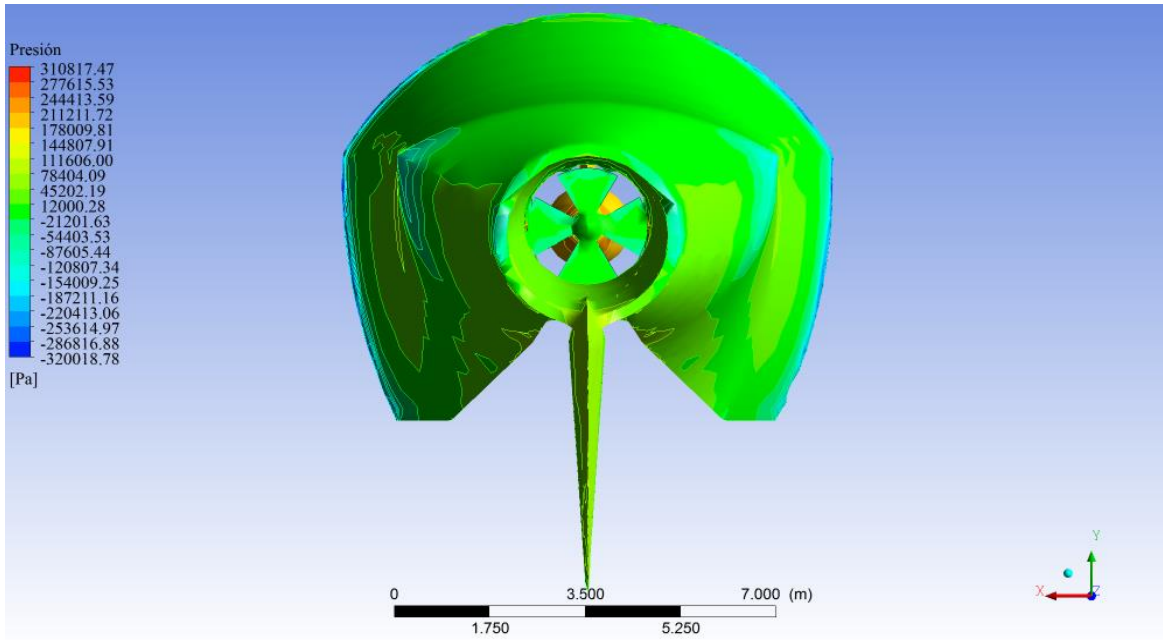


Figura V.2

Fuente: [EP]

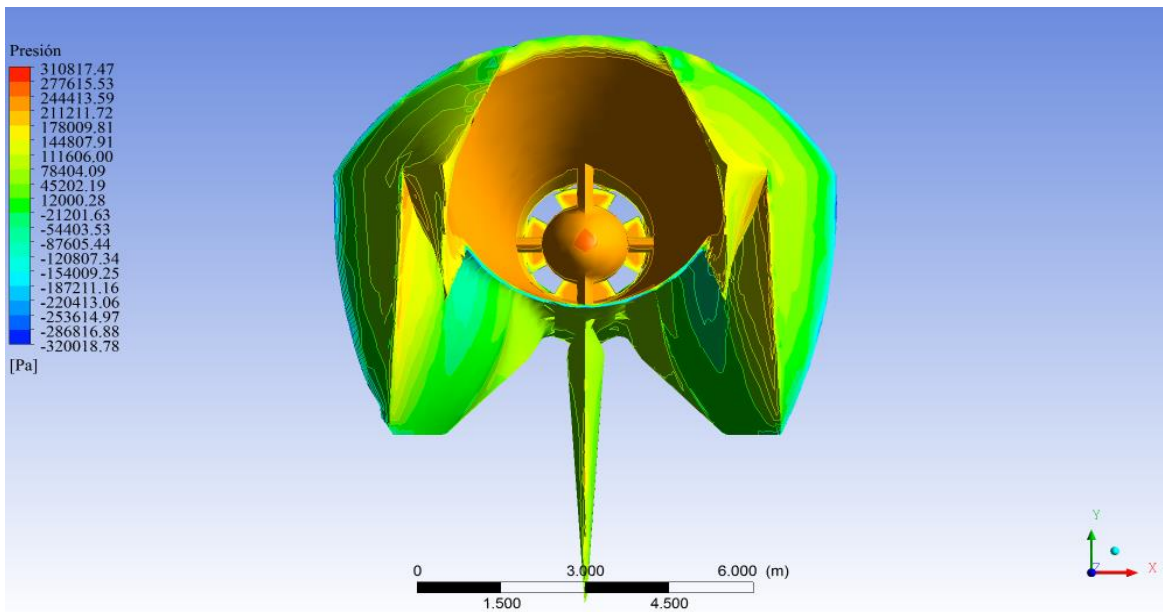


Figura V.3

Fuente: [EP]

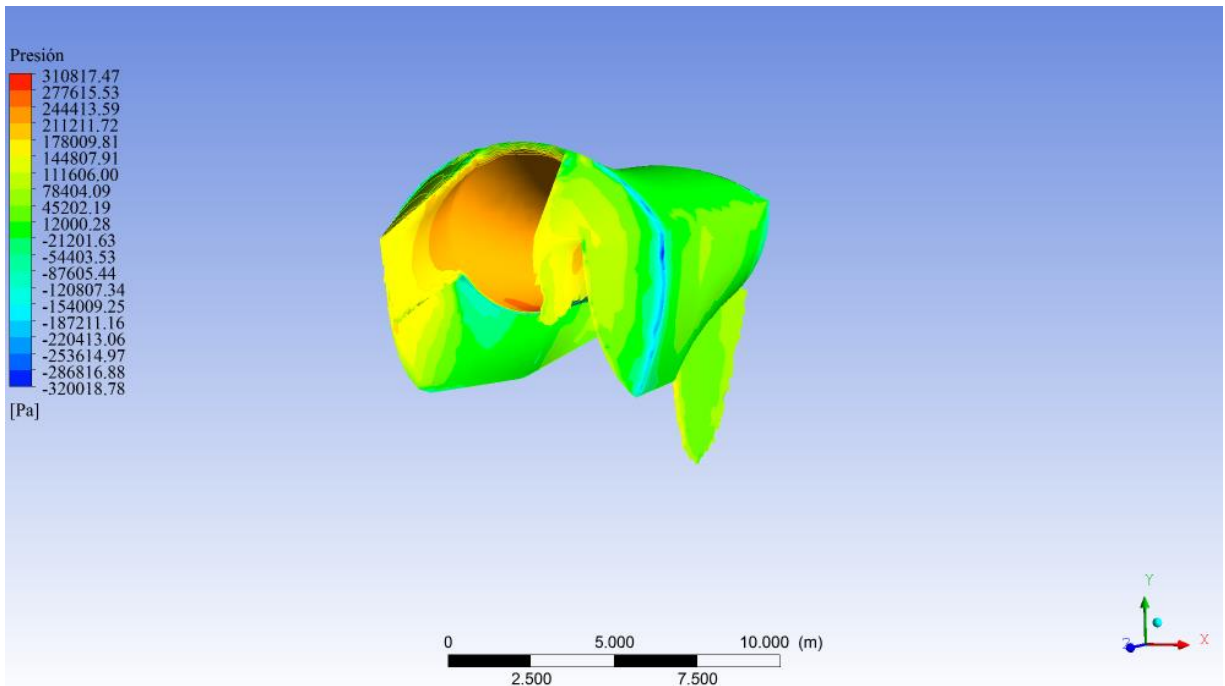


Figura V.4

Fuente: [EP]

Estas presiones varían entre los 311000 pascales y los -320100 pascales.

Estas presiones crean unas deformaciones y tensiones en la chapa de la estructura que son las siguientes:

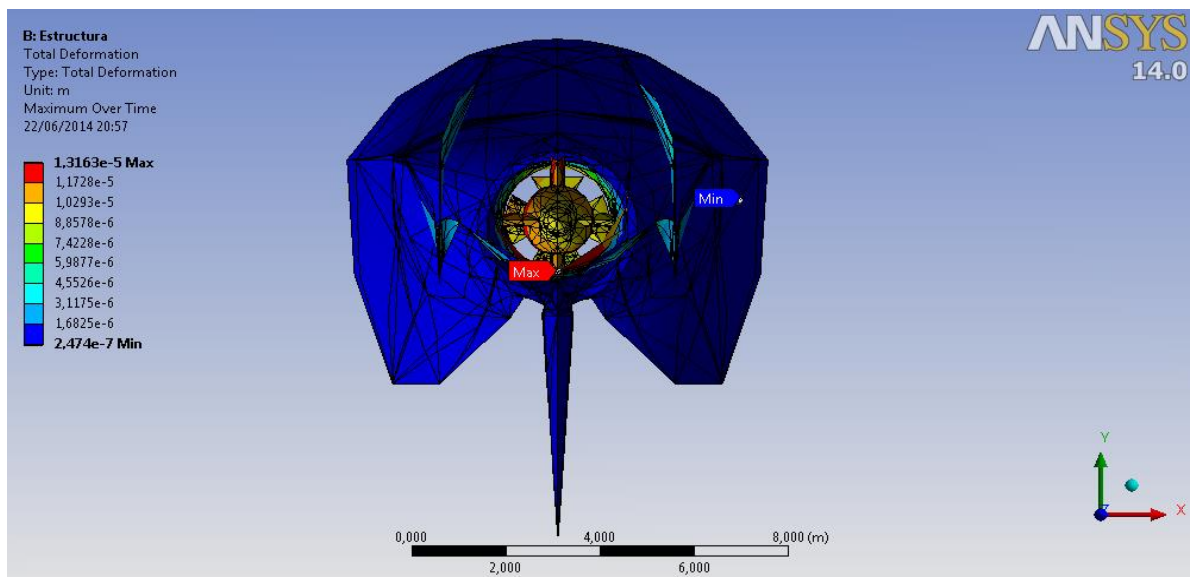


Figura V.5

Fuente: [EP]

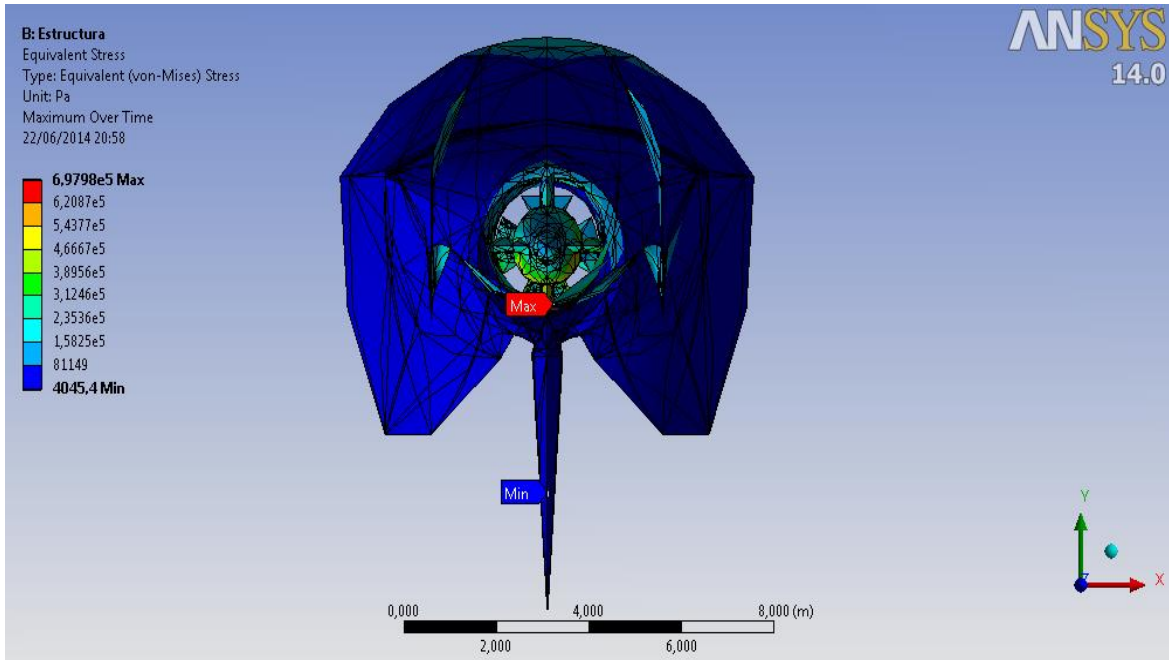


Figura V.6

Fuente: [EP]

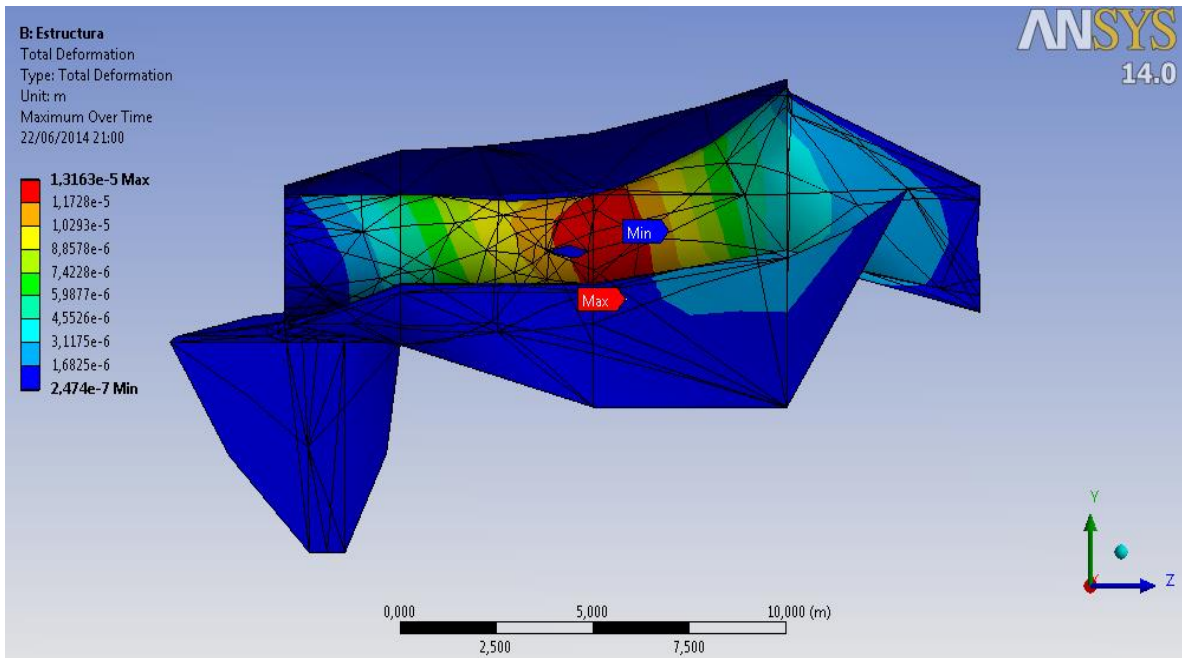


Figura V.6

Fuente: [EP]

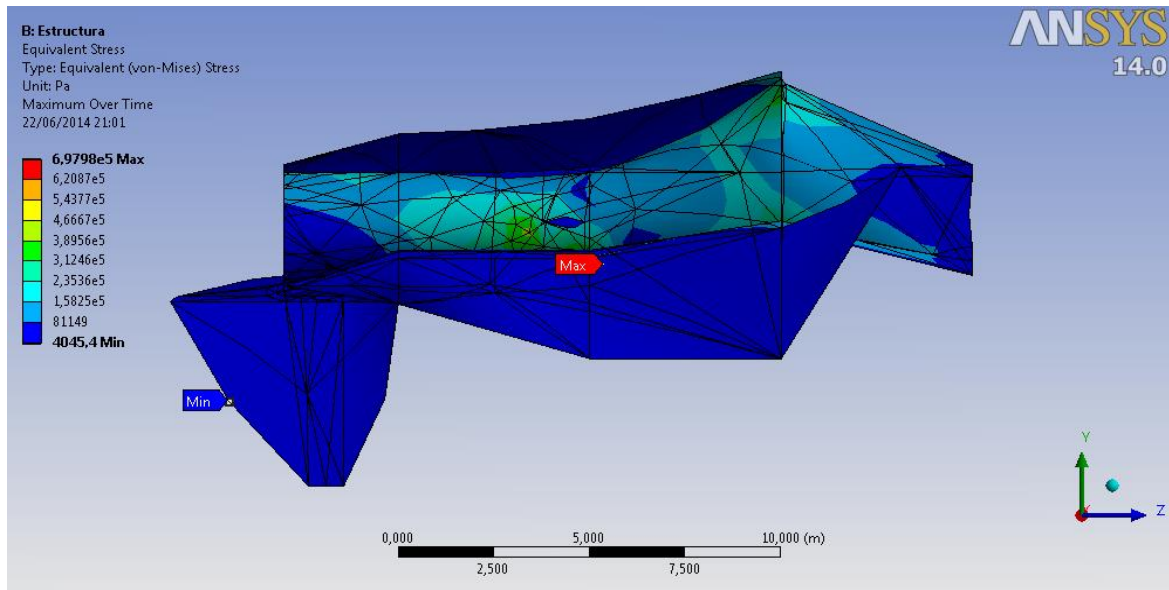


Figura V.6

Fuente: [EP]

Las tensiones en la estructura varían entre los 0.7 MPa y los 0.04 MPa y las deformaciones entre los 0.013 mm y los 0.00025 mm.

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

Como se observa el diseño es realmente eficiente en cuanto al arrastre y canalización del agua se refiere porque las presiones a las que es sometido son bajas, lo cual no permite realizar una estructura con un grosor de chapa fino concretamente de 2 centímetros tanto toda la superficie como las placas interiores y una estructura interna dimensiones reducidas, que a continuación se muestran. También hay podemos ver sus dimensiones acotadas en el plano que define su geometría.



Figura V.7

Fuente: [EP]

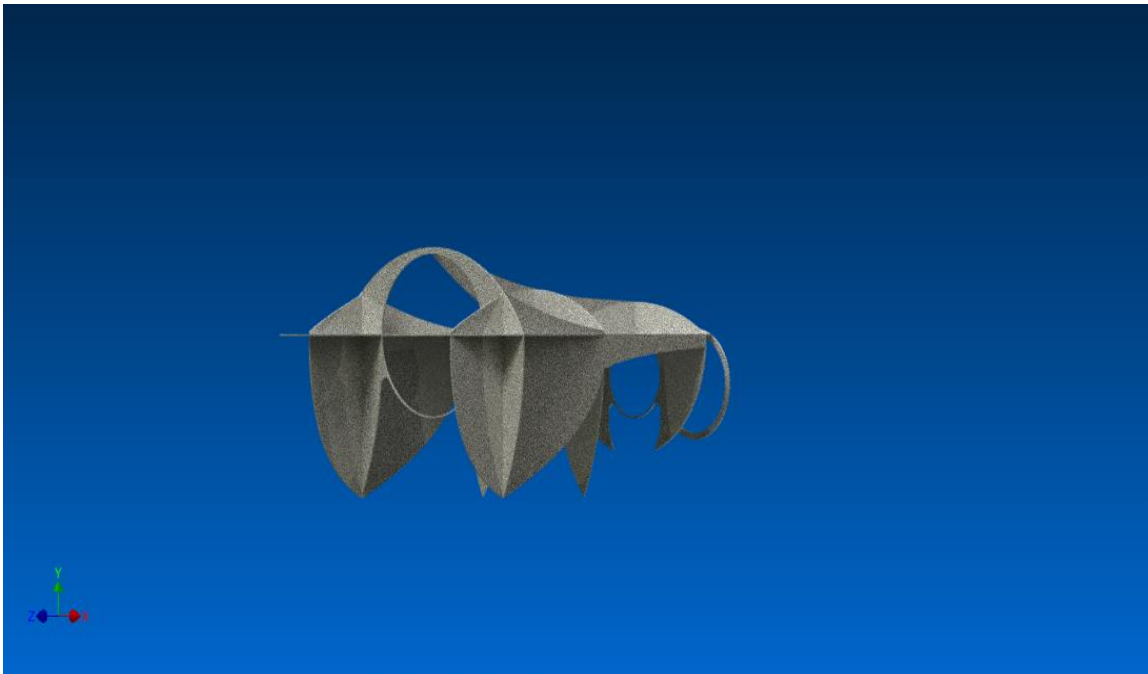


Figura V.8

Fuente: [EP]

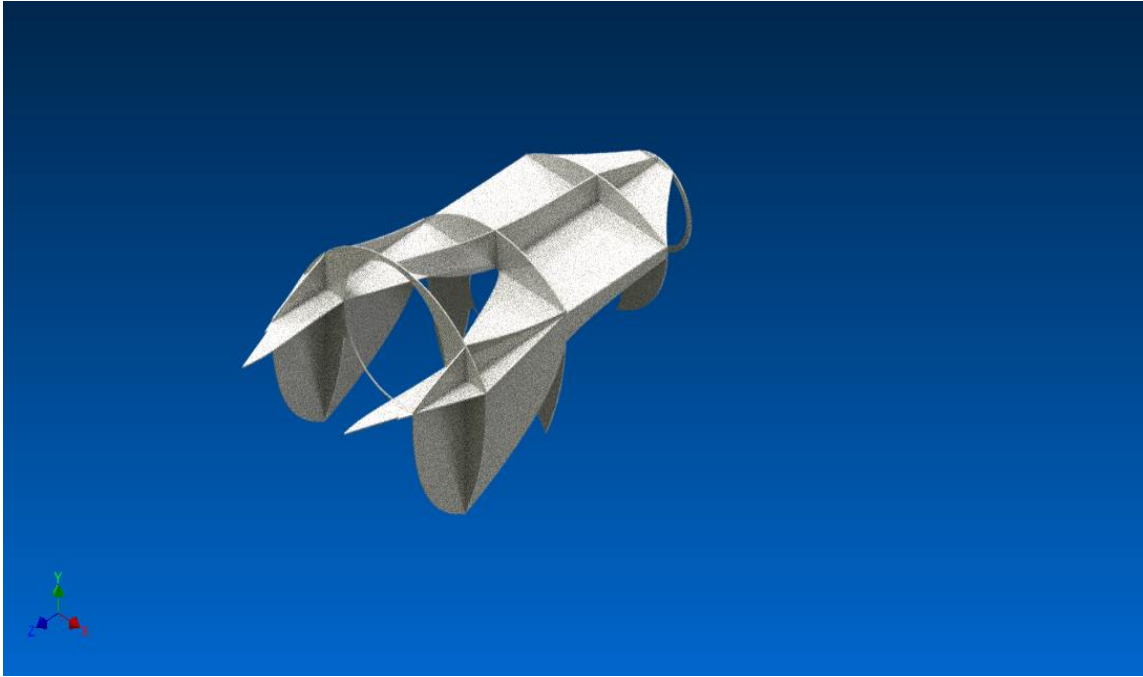


Figura V.9

Fuente: [EP]

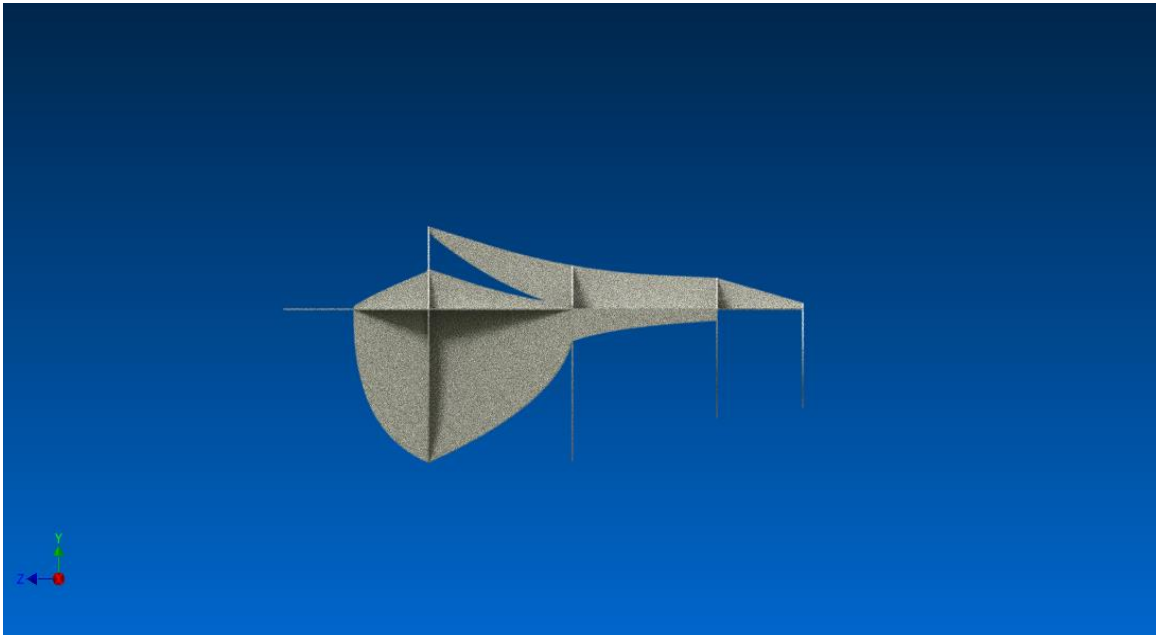


Figura V.10

Fuente: [EP]



Figura V.II

Fuente: [EP]

En cuanto a las fuerzas en sus componentes (X, Y, Z) que aparecen en la estructura debidas al paso de la ola también calculadas por este programa son:

(158187.75 1614398.7 -9972827.8) N

La fuerza de flotación, positiva según el eje Y de todas las figuras, será como máximo el peso de la estructura en aquellas situaciones extremas en el oleaje sumerge por completo, es decir 148933,274 kg y en las situaciones de funcionamiento normal la cota que anteriormente se dijo que se sumerge es aquella que crea una flotabilidad igual que si el 85% del diseño estuviese sumergido es decir una fuerza de 126593.283kg. Por lo tanto en el momento más desfavorable la estructura estará tirando de los cables con una fuerza igual a la suma de ambas es decir de 312 toneladas.

ELECCIÓN DE MATERIAL

El material empleado para la estructura es el acero y debido a las fuerzas que intervienen en la estructura emplearemos acero laminado S-235 con tratamiento anticorrosión ya que estará expuesto continuamente a la acción del agua salada.

Para anclar el diseño al fondo marino se emplearán varios bloques de hormigón con un peso total de 312 toneladas capaces de soportar tanto las fuerzas verticales como las horizontales debida a la fuerza de arrastre.

Los cabos para unir la estructura con los bloques de hormigón podrán ser de nylon o de acero su elección dependerá del precio de cada uno.

CAPITULO VI

VALORACIÓN ECONÓMICA

COSTE ESTRUCTURA

Suponemos que un coste de 5 €/kg de acero en astillero es adecuado como estimación.

Suponemos que un coste de 50 €/m³ de hormigón en astillero es adecuado como estimación.

Total estructura = 148933.274 kg * 5 €/kg + 125 m³* 50 €/m³= 750916.37 €

COSTE TURBINA

A falta de establecer catálogos de turbinas tipo debido a que las empresas que las fabrican trabajan bajo pedido un precio de 500000 € la turbina parece razonable.

RENTABILIDAD Y VIABILIDAD ECÓNOMICA

Se ha calculado el caudal de cada ola, $Q=A*V$, área por velocidad. La velocidad se ha considerado la de transmisión de la energía que según el libro de Losada expone que es la mitad de la velocidad de propagación de la onda. Para calcular el área como la entrada del dispositivo es un círculo, es $\pi*r^2$ y el radio lo he considerado como la amplitud de la ola es decir la mitad de la altura de ola, para las olas con altura de 5 metros o inferior y para las que tienen una altura de ola superior a 5 metros ha limitado a 5 metros porque es el diámetro de entrada del tubo del dispositivo.

Se han sumado los caudales separándolos por años posteriormente se suman los caudales de todos los años de datos y esa suma se divide entre 153143, que son el número de datos que hay en el punto en cuestión, es decir, el número de horas total del registro de datos. Con esto es posible calcular el caudal medio horario de este punto, que es el más energético y da 65.87m³/s.

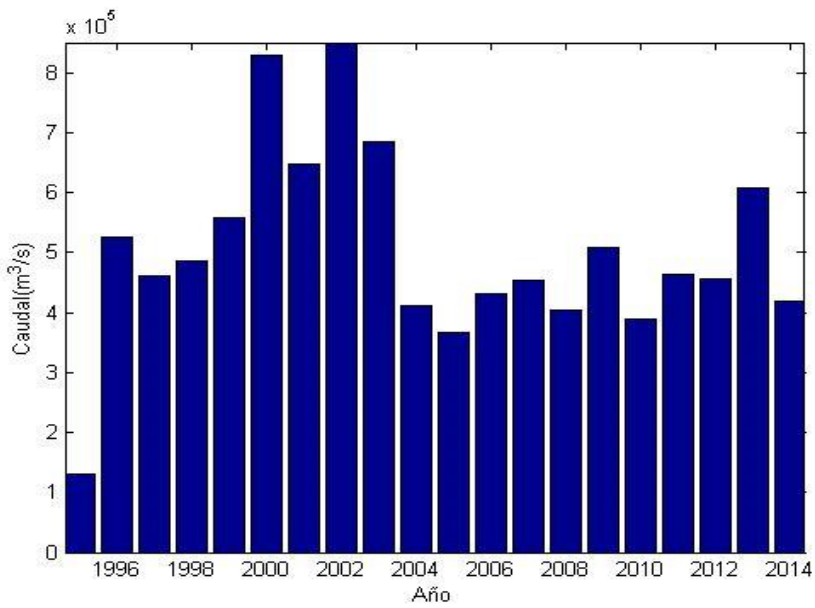


Figura VI.1

Fuente: [EP]

Con este caudal y sabiendo que la altura de trabajo de la turbina se sitúa casi siempre en el entorno de los 2 metros se entra en esta gráfica y sale una potencia cercana a 1.3MW cada hora.

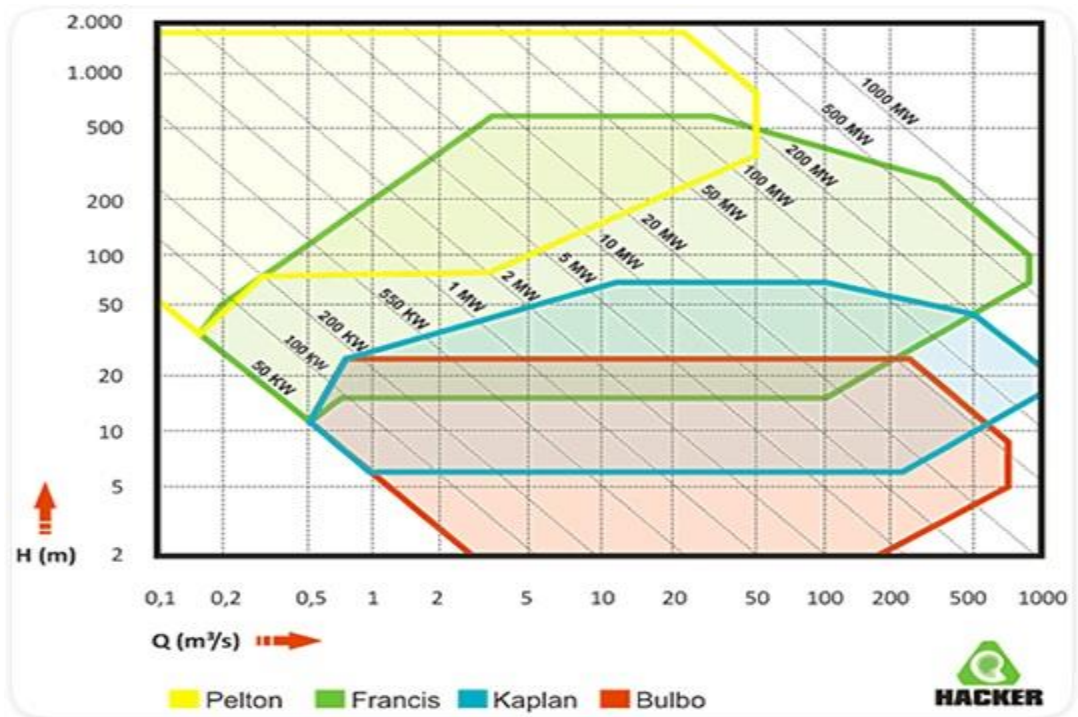


Figura VI.2

Fuente: [9]

El coste total del diseño estructura más turbina más gastos varios como pintura, remolcador, cabos, etcétera asciende a un total T.

$$T = 750916.37 \text{ €} + 500000 \text{ €} + 100000 \text{ €} = 1350916.37 \text{ €}$$

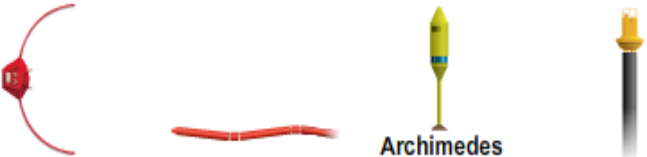
El coste de la unidad energética generada por el dispositivo es de coste/producción en este caso:

$$1350916.37 \text{ €} / 1300000 \text{ kWh} = 1.04 \text{ €} / \text{kWh}.$$

“La explotación de la energía del oleaje, como ocurre con muchas otras tecnologías renovables, precisa de altos costos de inversión. Los altos costes de capital se deben a la necesidad de construir grandes estructuras para captar una cantidad significativa de energía. Por otro lado, los costos de operación son relativamente bajos en los dispositivos costeros (bastantes más altos en los aparatos alejados de la costa), ya que no existen costes de combustibles, y los costes de operación, reparación y mantenimiento anuales solo representan entre un 3 a un 8 por ciento de los costes de inversión. Sin embargo, habrá costes de seguros que podrán ser altos en los primeros años cuando la experiencia en la tecnología sea limitada. La tecnología de la energía del oleaje, como ocurre con la mayoría de las otras tecnologías renovables, solo es rentable si los costos de capital por kW instalado es menor de 1600€.

Una consecuencia de los altos costes de capital es que se obtienen altos periodos de payback. El coste de la energía obtenida con los aparatos captadores de la energía de las olas es altamente dependiente del interés. Se estima que los aparatos instalados en la costa tengan un coste de la unidad energética generada entre 0,09€/kWh y 0,14€/kWh. Los costes de los aparatos instalados fuera de la costa presentan una mayor dispersión, pero se estima que se encuentren en el rango comprendido entre 0,18€/kWh y 0,49€/kWh. Esta claro que estos costes variarían de un país a otro, e incluso dentro de un mismo país, dependiendo del potencial del oleaje.” Fuente: [2]

La siguiente figura recoge varios de los diseños ya existentes y funcionando en la actualidad con el costo por proyecto.



	Wave Dragon	Pelamis	Archimedes Wave Swing	OPT Powerbuoy
Costo por proyecto (en euros)	13,5 millones (unidad en proyecto)	12 millones	265 millones	-
Potencia por unidad	11 MW	750 Kw	250 Kw	40 Kw
Funcionando en	Nissum Bredning, Dinamarca	Aguaçadoura, Portugal	Orkney, Escocia	Hawaii, EE.UU. New Jersey, EE.UU. Santofña, España (proyectos)

Figura VI.2

Fuente: [10]

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

En los diseños M8 y M9, concretamente el M9 podemos ver como conjuga las ventajas de los dos tipos principales de diseños aquí desarrollados el primer tipo del M1 hasta el M5 y el segundo tipo el M6 y M7. El primer tipo recoge el agua de forma eficiente pero posee unas dimensiones grandes lo que provoca que tenga gran resistencia al paso de la ola y el otro tipo es un casco de un barco adaptado para albergar una turbina con lo cual ofrece una resistencia mínima, al unir estos dos principales características y ventajas en el diseño M-9 vemos cómo se consigue canalizar el flujo de agua hacia la turbina y al mismo tiempo tener una influencia mínima al paso de la ola con lo cual los esfuerzos que se ocasionan en el diseño se ven reducidos drásticamente y por ello se puede reducir el espesor de la chapa que forma el casco del diseño y poder poner las costillas que refuerzan la estructura.

La turbina que se ha colocado es un modelo de turbina bulbo con características similares a las de las centrales mini hidráulicas debido a las dimensiones del diseño. Aunque como se aprecia en el cálculo hidráulico de diseño definitivo el tubo hace que la velocidad alcanzada sea elevada lo cual podría producir el fenómeno de la cavitación, para poder evitar este fenómeno se tiene que aumentar el diámetro del tubo en esa zona aunque cabe decir que la fabricación de un prototipo a escala del diseño M9 favorecería la comprensión de los fenómenos que realmente se producirán en el diseño.

En el CD se incorporan dos videos que explican de forma muy intuitiva la decisión de hacer la estructura flotante y pretensionada debido a la acción de sumergir a una cota que genere una fuerza vertical positiva de manera que limitamos los movimientos y no anclada mediante una estructura en celosía la cual ocasionaría que en las circunstancias de temporal el diseño se quedase por completo al descubierto lo cual al volver a impactar la ola ocasionaría grandes probabilidades de producir el fenómeno de la cavitación pero mucho más acentuado con los consecuentes peligros que esto conlleva. De los dos videos uno modeliza una ola tipo del tamaño máximo que el diseño es capaz de recoger y el en el otro se representa la ola con los parámetros más grandes de todo el punto, la misma ola con la que se ha hecho el cálculo estructural.

LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como material sugerente el acero corten y o acero inoxidable.

Optimización de la turbina en cuanto a diseño de palas, sistema reductor para aumentar la velocidad de giro del generador.

Valoración de cambio de parte del diseño para albergar dos turbinas bulbo o de otro tipo.

Simulación en que se visualice la oscilación del diseño y de la turbina respecto al diseño con sistemas estabilizadores para mantener la posición inicial de trabajo constante.

Simulación dinámica de los movimientos de la turbina con el sistema anteriormente comentado así como el giro de la misma y comprobar si es eficiente el sistema estabilizador.

Elaboración de un parque de este tipo de diseños para ver su impacto visual en una localización que no tenga ningún problema medioambiental y de tráfico marítimo.

Proyecto de construcción real del diseño en astillero, con estudio de seguridad y salud, plan de obra, presupuestos descompuestos.

La generación de electricidad de la maquina será en media tensión (3000-6000 V) y se llevará a tierra firme para su transformación y posterior distribución.

BIBLIOGRAFÍA

[EP]:Elaboración Propia

[1]:<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

[2]:<http://mudloggerstories.blogspot.com.es/2013/02/plataformas-rigs-tipos.html>

[3]:<http://www.schahin.com.br/es/areas-de-negocio-2/petroleo-e-gas-2/sondas-de-producao-3/jack-up-north-star-i-3>

[4]:<http://nom.nb.no/eng/The-Field/Statfjord-B/Building-the-concrete-GBS>

[5]:<https://www.flickr.com/photos/evartdal/456411892/>

[6]:<http://mudloggerstories.blogspot.com.es/2013/02/plataformas-rigs-tipos.html>

[7]:<http://www.enola.ihcantabria.com>

[8]:http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

[9]:http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_hidraulicas.php

[10]:<http://profesores.fi->

b.unam.mx/13prof/Carpeta%20energ%EDa%20y%20ambiente/ultimas%20dos%20clases%20renov%20y%20usos/ENERG%CDA%20UNDIMOTRIZ.ppt

[L1]:Fundamentos del Movimiento Oscilatorio (A. Baquerizo, M.A. Losada y M^a López)

PROGRAMAS EMPLEADOS

Para el diseño de los modelos por ordenador se ha empleado: Autodesk Inventor.

Para el cálculo matemático de los puntos WANA se ha empleado: Matlab.

Para el cálculo hidráulico y el estructural se ha empleado: Ansys Fluent y Ansys Static Structural.



CONJUNTO DE DATOS WANA

Procedencia y obtención del conjunto de datos

El conjunto de datos WANA está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Los series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es). No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelado y consistente con las observaciones realizadas.

Es importante tener en cuenta que las series temporales de viento y oleaje del conjunto WANA no son homogéneas, pues los modelos de viento y oleaje se van modificando de modo periódico para introducir mejoras. Estas mejoras han permitido, entre otras cosas, aumentar la resolución espacial y temporal de los datos a partir de los cuales se genera la información del conjunto WANA. La siguiente tabla muestra la evolución de los cambios en la resolución temporal y espacial de los modelos:

VIENTO (HIRLAM)						
	1996-2006		2006-2012		2012-presente	
	temporal	espacial	temporal	espacial	temporal	espacial
	6h	30Km	6h	9Km	1h	3Km

OLEAJE						
	1996-2006		2006-2012		2012-presente	
Cantábrico	3h	15km	3h	2.5Km	3h	2.5Km
Cádiz	3h	15km	3h	5Km	3h	5Km
Canarias	3h	15km	3h	5Km	3h	5Km
Mediterráneo	3h	7.5h	3h	5Km	3h	5Km
Estrecho Gibraltar	--	--	3h	1Km	3h	5Km

Tabla 1. Evolución en la resolución espacial y temporal de los modelos con los que se genera el conjunto de datos WANA.

Seguidamente se da una breve descripción de los modelos numéricos utilizados para generar las series de viento y oleaje.



Viento

El modelo atmosférico utilizado para generar los campos de vientos es el HIRLAM, de AEMET. Este es un modelo atmosférico mesoescalar e hidrostático. Los datos de viento facilitados son 10 metros del altura sobre el nivel del mar.

Los datos de viento no reproducen efectos geográficos ni procesos temporales de escalas inferiores a la resolución con la que se ha integrado el modelo de atmósfera (consultar la Tabla 1 para conocer la resolución del modelo HIRLAM y su evolución con el paso del tiempo). No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc.

Oleaje

Para generar los campos de oleaje se han utilizado dos modelos: WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo HIRLAM. Ambos son modelos espectrales de tercera generación que resuelven la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis *a priori* sobre la forma del espectro de oleaje. La resolución espacial de los modelos varía dependiendo de la zona, ya que se han desarrollado aplicaciones específicas para diferentes áreas: Atlántico, Mediterráneo, Cantábrico, Cádiz, Canarias y Estrecho de Gibraltar (consultar Tabla 1 para más detalle).

Se ha realizado una descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se han considerado dos contribuciones posibles para el mar de fondo.

Es importante tener en cuenta, que, con independencia de la coordenada asignada a un nodo WANA, los datos de oleaje deben de considerarse, siempre, como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas.

Precauciones de uso

El conjunto de datos WANA proporciona descripciones del clima de viento y oleaje, que en general, son adecuadas en todo el entorno litoral español. No obstante, es necesario tener cautela en las siguientes zonas:

- De forma general se puede decir que los modelos tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo. Se aconseja pues cotejar la magnitud aproximada del temporal con datos instrumentales de la zona.
- En el Sur del Archipiélago Canario pueden no reproducirse bien condiciones procedentes del Sur Oeste.

Parámetros disponibles

- Oleaje



- Altura significativa espectral
 - Periodo de pico espectral
 - Periodo medio espectral (momentos 0 y 2)
 - Dirección Media de Procedencia del Oleaje
 - Altura, y Dirección de Mar de Viento
 - Altura, Periodo medio y Dirección de Mar de Fondo
- Viento
- Velocidad media
 - Dirección medida de Procedencia del Viento

Puntos disponibles

La figura 1 muestra las posiciones de los nodos WANA almacenados en el Banco de Datos Oceanográficos. Las series comienzan en 1996 y desde ese año se actualiza diariamente. La cadencia de la serie es de un registro cada 3 horas.

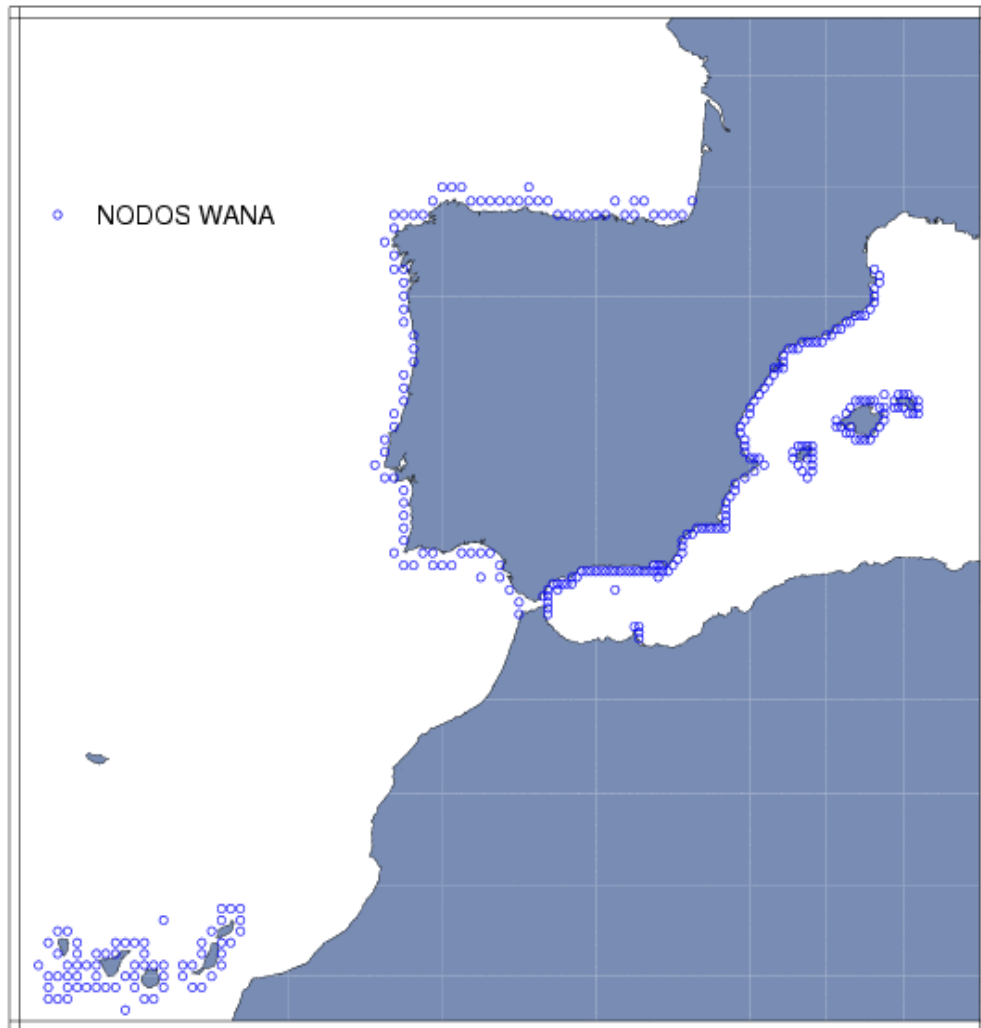


Figura 1. Distribución espacial de los Nodos WANA

Los datos de oleaje del conjunto WANA pueden consultarse de modo interactivo en la página Web de Puertos del Estado. Para ello es necesario acceder mediante la ruta:

www.puertos.es > Oceanografía y Meteorología > Datos en tiempo real, predicciones y banco de datos

o bien mediante el enlace:

http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html



7
C

Puertos del Estado



Por otro lado, es posible adquirir tanto series temporales, como informes climáticos basados en este conjunto. Para ello debe enviarse un correo electrónico a la atención de “Susana Pérez” (sperez@puertos.es) o a la de “Pilar Gil” a través de la dirección (pilar@puertos.es).

CALCULO EN MATLAB

Código desarrollado en Matlab para resolver las cuestiones matemáticas anteriormente comentadas. Copiar y pegar directamente en el programa y ejecutar para iniciarlo.

```
close all
```

```
clear all
```

```
a = load('ubicación del archivo de datos separado en 3h.txt');
```

```
b = load('ubicación del archivo de datos separado en 1h.txt');
```

```
altura_3h = a(:,5);
```

```
periodo_3h = a(:,7);
```

```
year1 = b(:,1);
```

```
altura_1h = b(:,5);
```

```
periodo_1h = b(:,7);
```

```
AA = a(:,1);
```

```
%-----
```

```
%-----
```

```
%Media de la altura de ola significativa espectral.
```

```
media_altura = mean(altura_3h);
```

```
%Altura significativa espectral máxima y mínima.
```

```
minima_altura = min(altura_3h);
```

```
maxima_altura = max(altura_3h);
```

```
%Valor de la desviación estándar de los valores.
```

```
desv_altura = std(altura_3h);
```

```
%Calcula una interpolación de la altura de ola, cúbica (1) y por el método de
```

```
%Hermite (2), de los datos con cadencia de tres horas para conseguir datos con
```

```
%cadencia de una hora.
```

```
x = (0:length(altura_3h)-1);
```

```
y = altura_3h';
```

```
u = 1/3;
```

```
xi = (0:u:length(altura_3h)-1);
```

```

yispl_altura = interp1(x,y,xi,'spline');
yipch_altura = interp1(x,y,xi,'pchip');
%Calculam la media y la desviación estándar de las dos interpolaciones y
%la desviación que más se aproxime a la de los datos sin interpolar es la
%que implica una mejor interpolación.
mediala = mean (yispl_altura);
desv1a = std(yispl_altura);
media2a = mean (yipch_altura);
desv2a = std(yipch_altura);
%-----
%Media del periodo de pico espectral.
media_periodo = mean(periodo_3h);
%Periodo de pico espectral máximo y mínimo.
minima_periodo = min(periodo_3h);
maxima_periodo = max(periodo_3h);
%Valor de la desviación estándar de los valores.
desv_periodo = std(periodo_3h);
%Calcula una interpolación del periodo, cúbica (1) y por el método de
%Hermite (2), de los datos con cadencia de tres horas para conseguir datos con
%cadencia de una hora.
xp = (0:length(periodo_3h)-1);
yp = periodo_3h';
u = 1/3;
xip = (0:u:length(periodo_3h)-1);
yispl_periodo = interp1(xp,yp,xip,'spline');
yipch_periodo = interp1(xp,yp,xip,'pchip');
%Calcula la media y la desviación estándar de las dos interpolaciones y
%la desviación que más se aproxime a la de los datos sin interpolar es la
%que implica una mejor interpolación.
medialp = mean (yispl_periodo);
desv1p = std(yispl_periodo);
media2p = mean (yipch_periodo);
desv2p = std(yipch_periodo);

```

```

%-----
%-----
%Une los datos interpolados de una hora con los datos del punto WANA que ya
%van de hora en hora, tanto de altura de ola como de periodo.
union_altura = [yipch_altura';altura_1h];
union_periodo = [yipch_periodo';periodo_1h];
%-----
%-----
%Interpola el año para sacar el número de datos.
x = (0:length(AA)-1);
u = 1/3;
xi = (0:u:length(AA)-1);
y = AA';
yispl_year = interp(x,y,xi,'spline');
%-----
%Vector con los datos de los años interpolados.
year = round(yispl_year');
%-----
%-----
%Calcula el número de onda y posteriormente comprueba que  $Ak \ll 1$ .
longitud = (9.81/(2*pi))*union_periodo.^2;
amplitud = union_altura./2;
k = (2*pi)./longitud;
producto = amplitud.*k;
figure
histfit(producto,30);
axis('tight');
xlabel('Ak');
ylabel('Número de olas');
%-----
%-----
%Calcula la energía cinética de una ola en una longitud de ola según la ecuación
%(5.4) del libro "Fundamentos del Movimiento Oscilatorio".

```

```

union_year = [year;year!];
oo = 3600./union_periodo;
fecha = union_year(1);
j = 1;
%Calcula la longitud del vector fecha.
for i=1:length(union_year)
    if union_year(i)~=fecha
        fecha=union_year(i);
        j=j+1;
    end
end
E_cada_year = zeros(j,1);
velocidad = zeros(j,1);
vel_energia = zeros(j,1);
olas = zeros(j,1);
fecha = year(1);
date = zeros(j,1);
j = 1;
%Calcula la energía de cada año de los que dispone la serie de datos de
%este punto WANA.
for i=1:length(union_year)
    %Agrupa en años.
    if union_year(i)~=fecha

        fecha = union_year(i);
        j=j+1;

    end
    %El vector 'olas' cuenta el número de olas por hora tomando como que
    %todas las olas de esa hora tienen el periodo de pico que aparece en el
    %txt del punto WANA que en cuestión.
    olas(i) = 3600/union_periodo(i);
    %Calcula la celeridad, velocidad de propagación de la onda.

```

```

velocidad(i) = longitud(i)./union_periodo(i);
%Calcula la velocidad de propagación de la energía como.
vel_energia(i) = velocidad(i)/2;
%Como la ecuación de la energía cinética (5.4) viene dada en función
%de la longitud de ola y amplitud de la misma, es decir da la energía
%de una sola ola, la multiplicamos por el vector 'olas' y tenemos la
%energía por hora. Sumando todas estas energías y tenemos la de cada año.
E_cada_year(j) = E_cada_year(j)+(1025*9.81*longitud(i)*amplitud(i).^2/4)*olas(i);
date(j)=fecha;
end
%Calcula la velocidad media de transmisión de la energía en el punto.
vel_media = sum(vel_energia)/153143;
%Calcula el caudal de cada año.
caudal = zeros(j,1);
amp=zeros(i,1);
po=5;
j=0;
i=1;
for i=1:length(union_year)
    %Agrupa en años.
    if union_year(i)~=fecha
        fecha = union_year(i);
        j=j+1;
    end
    if amplitud(i) <= po
        amp(i) = amplitud(i);
    else
        amp(i) = 5;
    end
    caudal(j) = caudal(j) + (pi*amp(i).^2).*vel_energia(i);
    date(j)=fecha;
end
caudal_medio_punto = sum(caudal)/153143;

```



```

%-----
%La energía cinética de todo el punto WANA (con la cadencia de una hora) es
%la sumatoria de E_WANA:
E=(1025*9.81/4).*longitud.*amplitud.^2.*oo;
E_WANA=sum(E);
%-----
%-----
%Calcula la interpolación de la dirección de las olas de los datos que
%tienen cadencia de 3h para luego unirlo con los que tienen cadencia de 1h
%y poder sacar la dirección de procedencia de las olas para posteriormente
%orientar el aparato según la dirección que más se repita, la predominante.
dir_ola_3h = a(:,8);
dir_ola_1h = b(:,8);
%Calcula una interpolación de la dirección de la ola, cúbica (1) y por el
%método de Hermite (2), de los datos con cadencia de tres horas para conseguir %datos con cadencia de una
hora.
x = (0:length(dir_ola_3h)-1);
y = dir_ola_3h';
u = 1/3;
xi = (0:u:length(dir_ola_3h)-1);
yispl_dir_ola_3h = interp(x,y,xi,'spline');
yipch_dir_ola_3h = interp(x,y,xi,'pchip');
%Calcula la media y la desviación estándar de las dos interpolaciones y
%la desviación que más se aproxime a la de los datos sin interpolar es la
%que implica una mejor interpolación.
media_dir_ola = mean(yispl_dir_ola_3h);
desv_dir_ola = std(yispl_altura);
media_dir_ola1 = mean(yipch_dir_ola_3h);
desv_dir_ola1 = std(yipch_altura);
union_dir_ola = [yipch_dir_ola_3h';dir_ola_1h];
wdir = (pi/180).*union_dir_ola;
%-----
%-----

```

```
%Representación de las alturas ordenadas de mayor a menor y ajuste de la
%curva mediante un polinomio, para poder decidir qué forma toma la "trompeta"
%de admisión del aparato.
```

```
altura_ordenada = sort(union_altura,'descend');
```

```
xxx = (0:i-1)';
```

```
p = polyfit(xxx,altura_ordenada,20);
```

```
val = polyval(p,xxx');
```

```
figure
```

```
plot(xxx,altura_ordenada,'r',xxx,val,'b')
```

```
xlabel('Número de olas');
```

```
ylabel('Altura de ola');
```

```
%-----
```

```
%-----
```

```
%Graficas varias.
```

```
figure
```

```
bar(date,E_cada_year);
```

```
axis('tight');
```

```
xlabel('Año');
```

```
ylabel('Energía(J/m)');
```

```
figure
```

```
bar(date,caudal);
```

```
axis('tight');
```

```
xlabel('Año');
```

```
ylabel('Caudal(m^3/s)');
```

```
figure
```

```
histfit(union_altura,60);
```

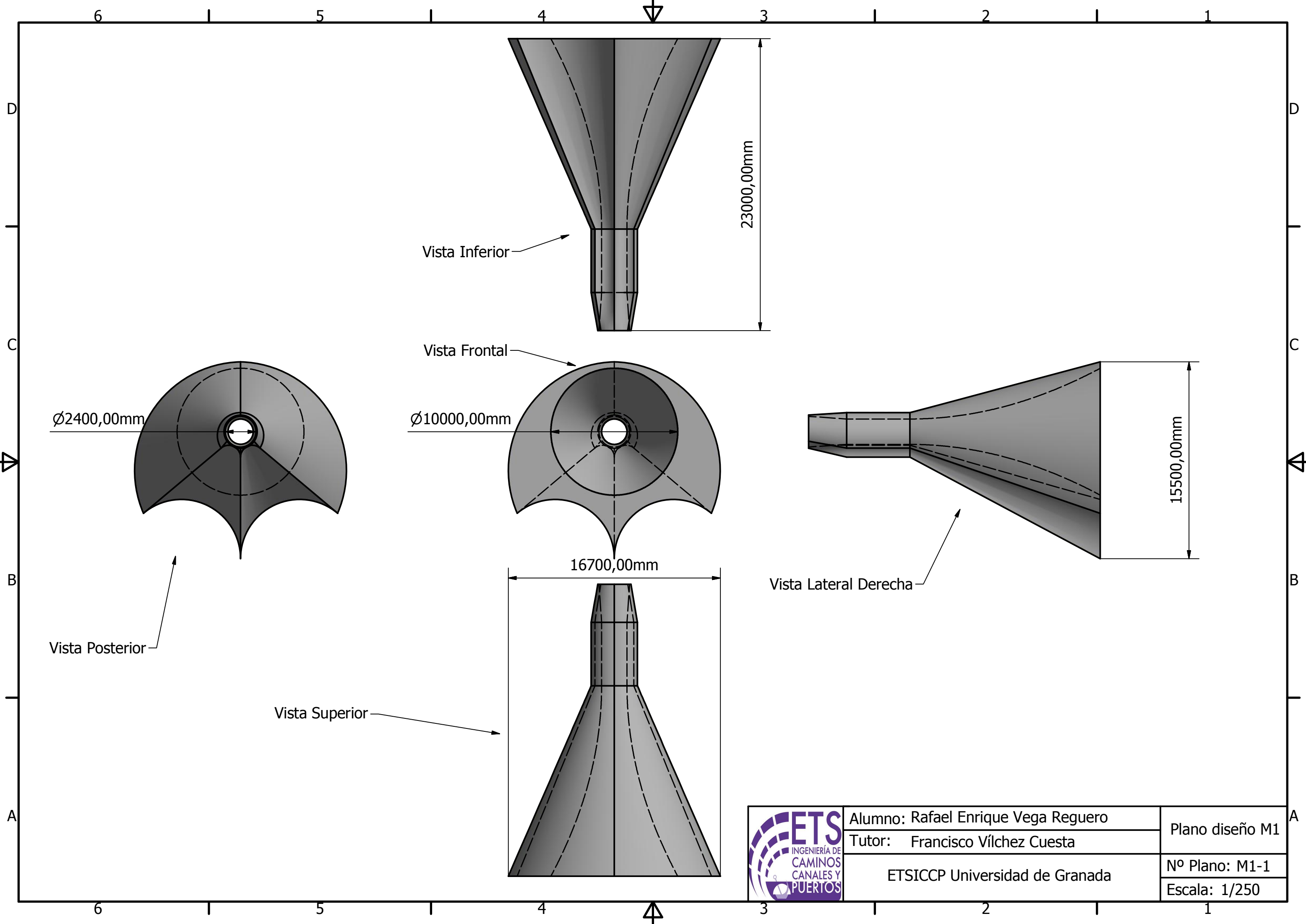
```
axis('tight');
```

```
xlabel('Altura de ola');
```

```
ylabel('Número de olas');
```

```
figure
```

```
rose(wdir,25);  
hline = findobj(gca,'Type','line');  
set(hline,'LineWidth',2.5);  
axis('tight');  
xlabel('Dirección');
```



Vista Inferior

Vista Frontal

Vista Posterior

Vista Superior

Vista Lateral Derecha

Ø2400,00mm

Ø10000,00mm

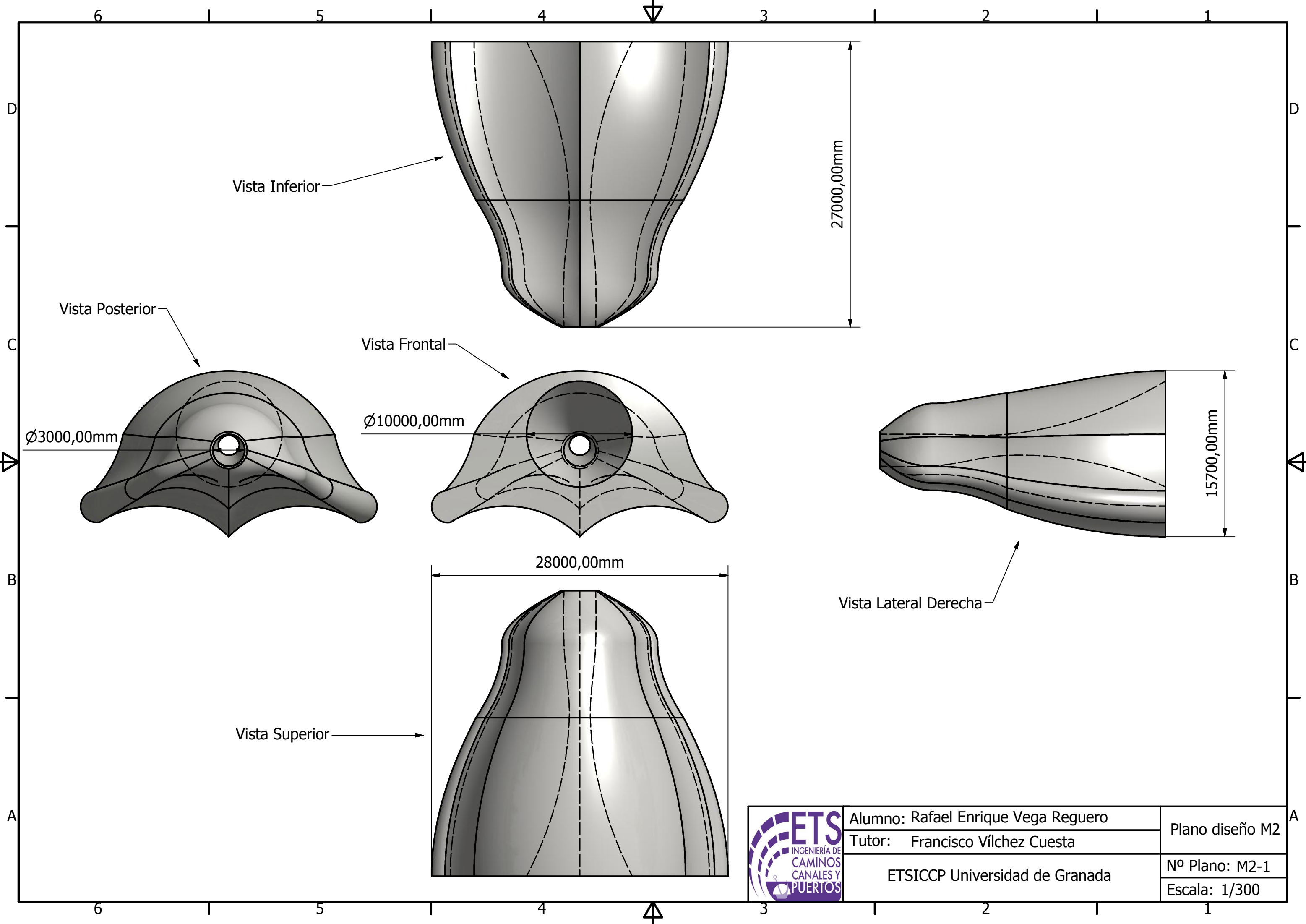
23000,00mm

16700,00mm

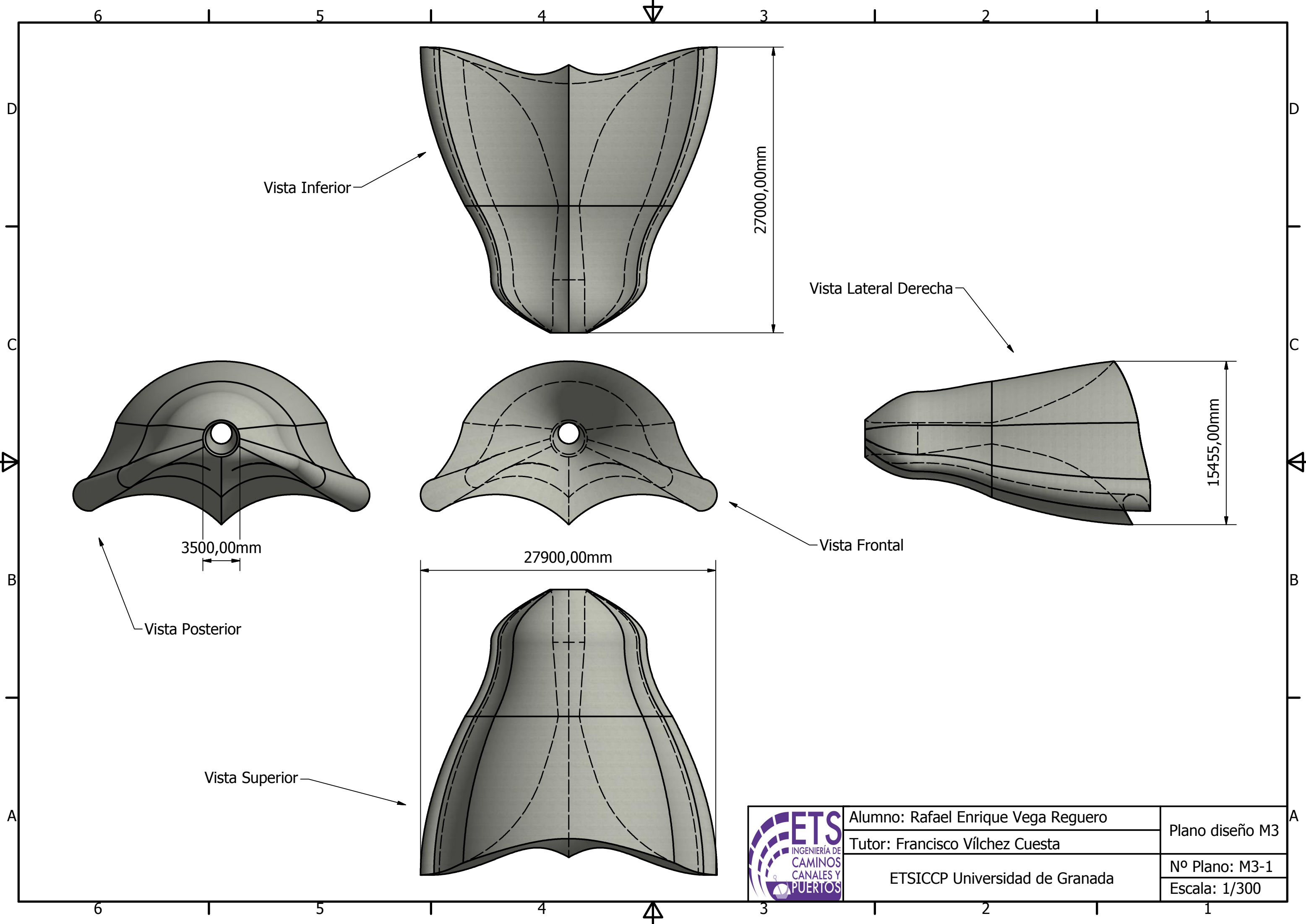
15500,00mm



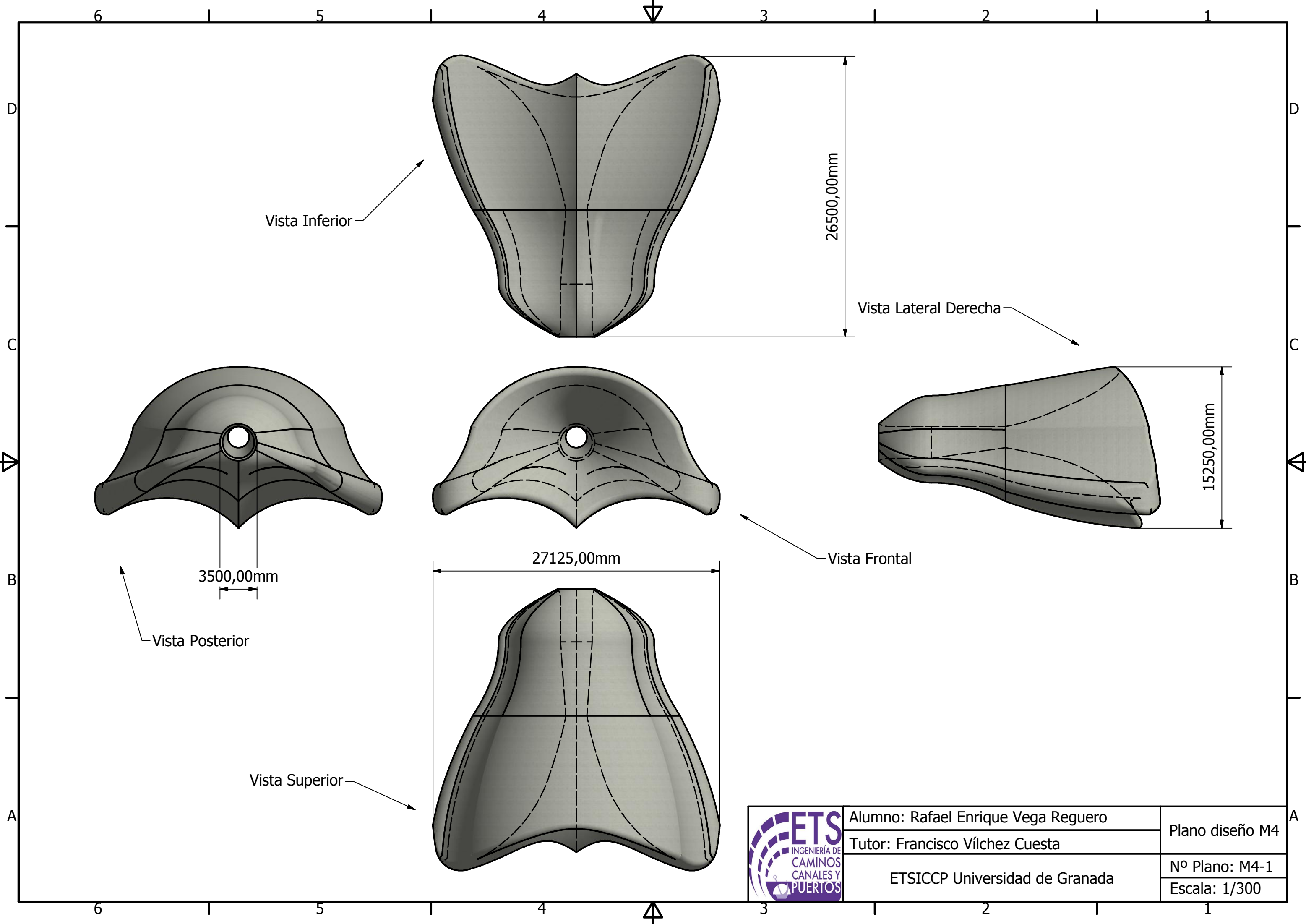
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M1
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	
	Nº Plano: M1-1
	Escala: 1/250



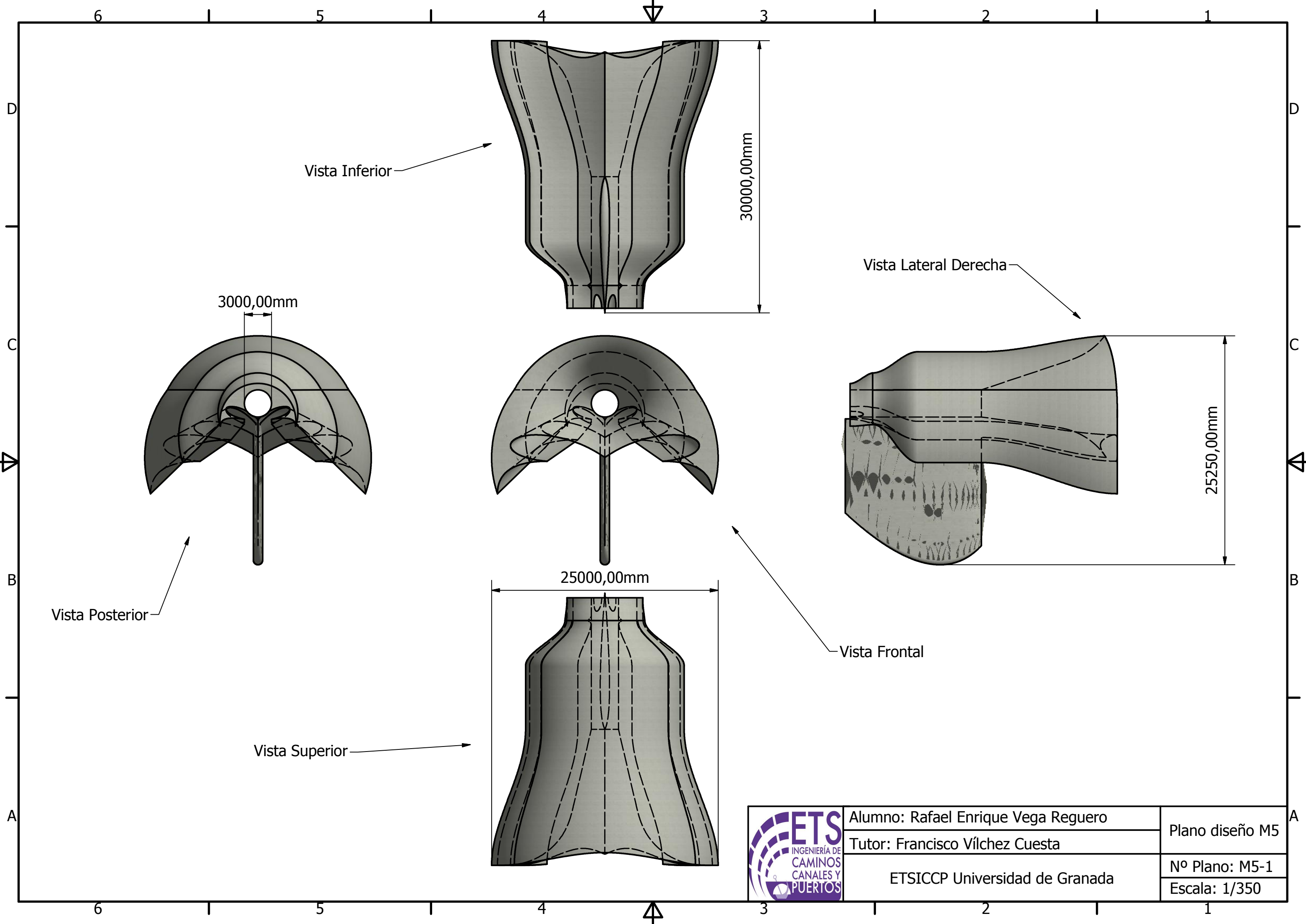
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M2	
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta		
ETSICCP Universidad de Granada		Nº Plano: M2-1
		Escala: 1/300



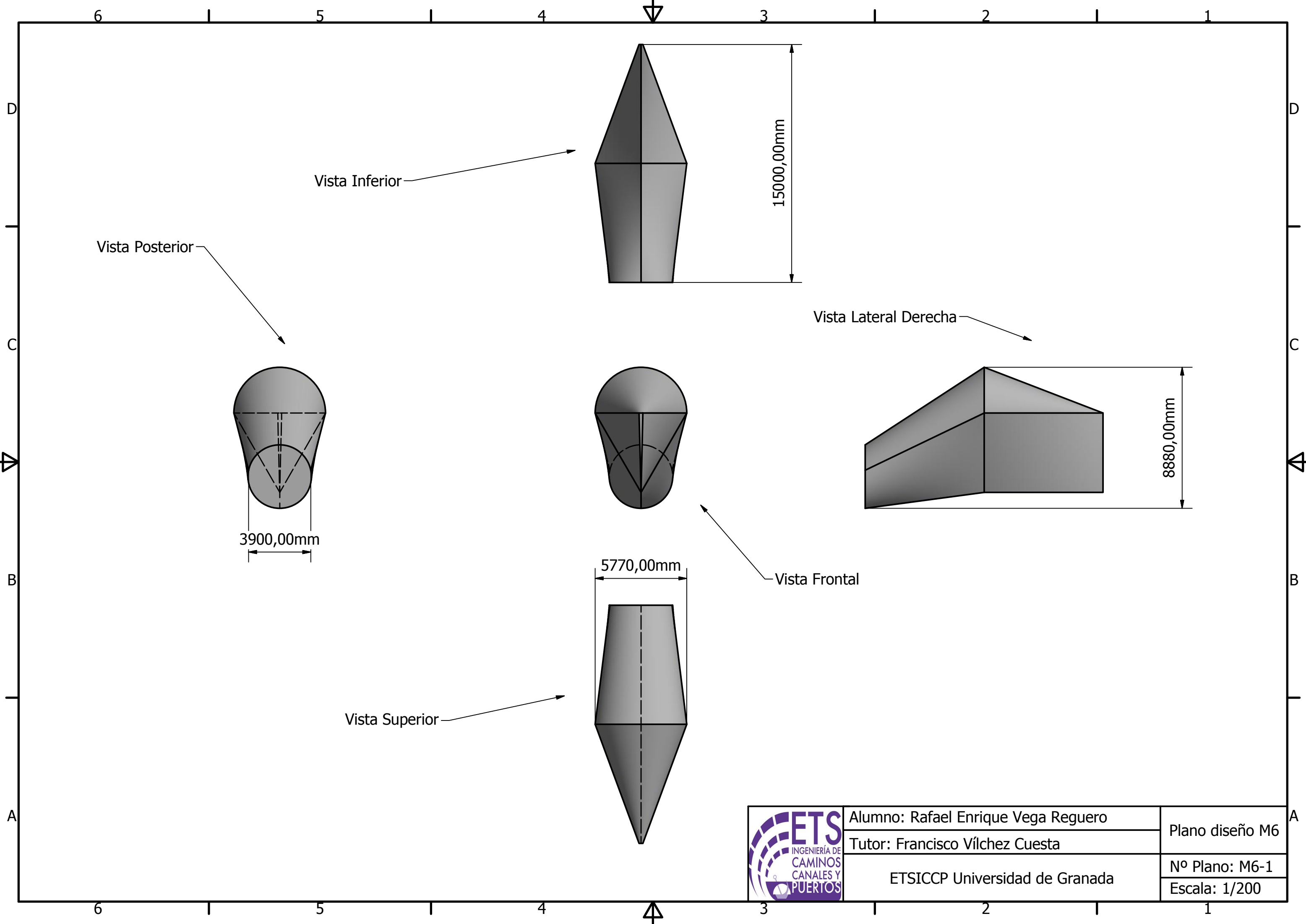
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M3
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M3-1
	Escala: 1/300



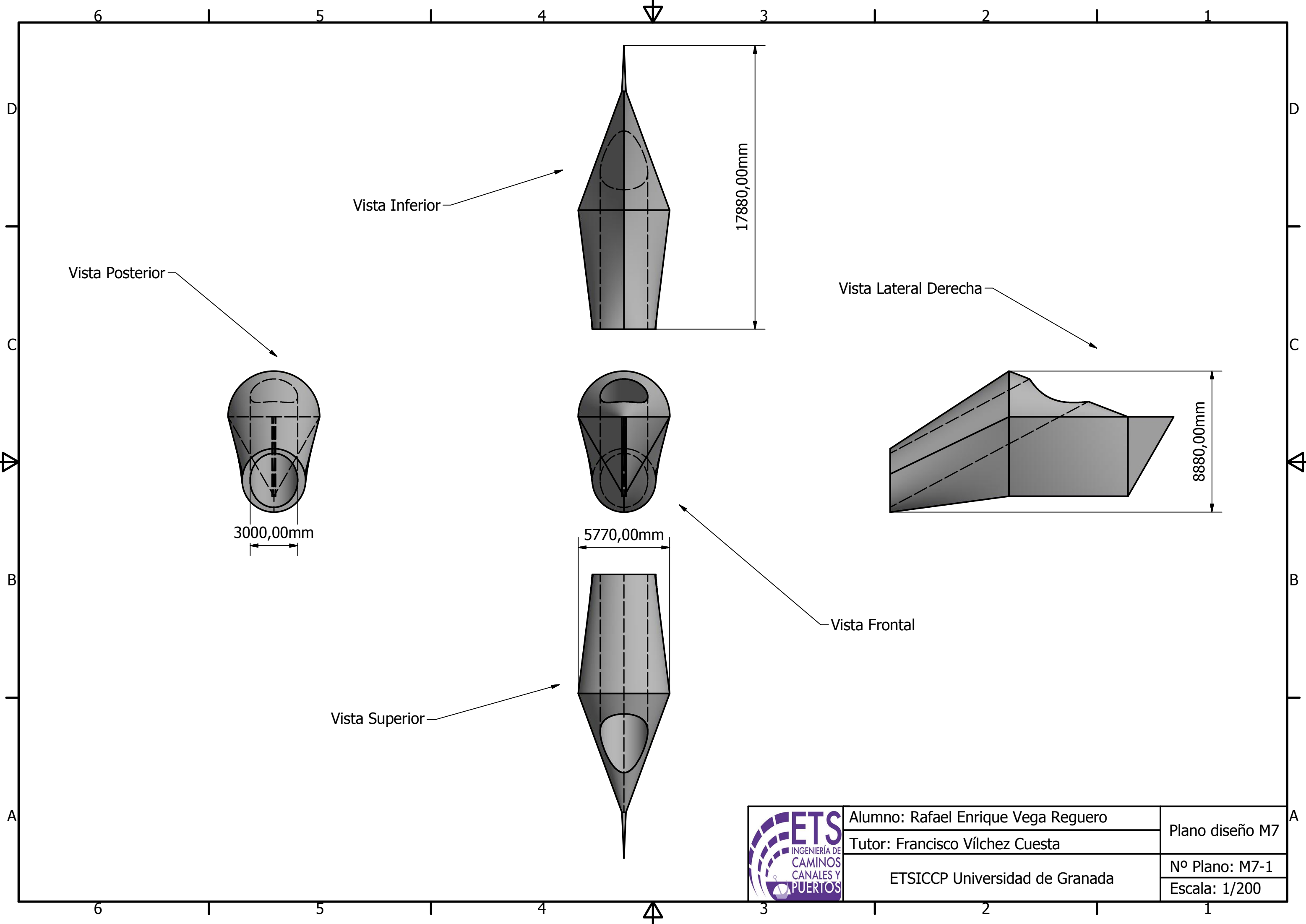
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M4
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M4-1
	Escala: 1/300



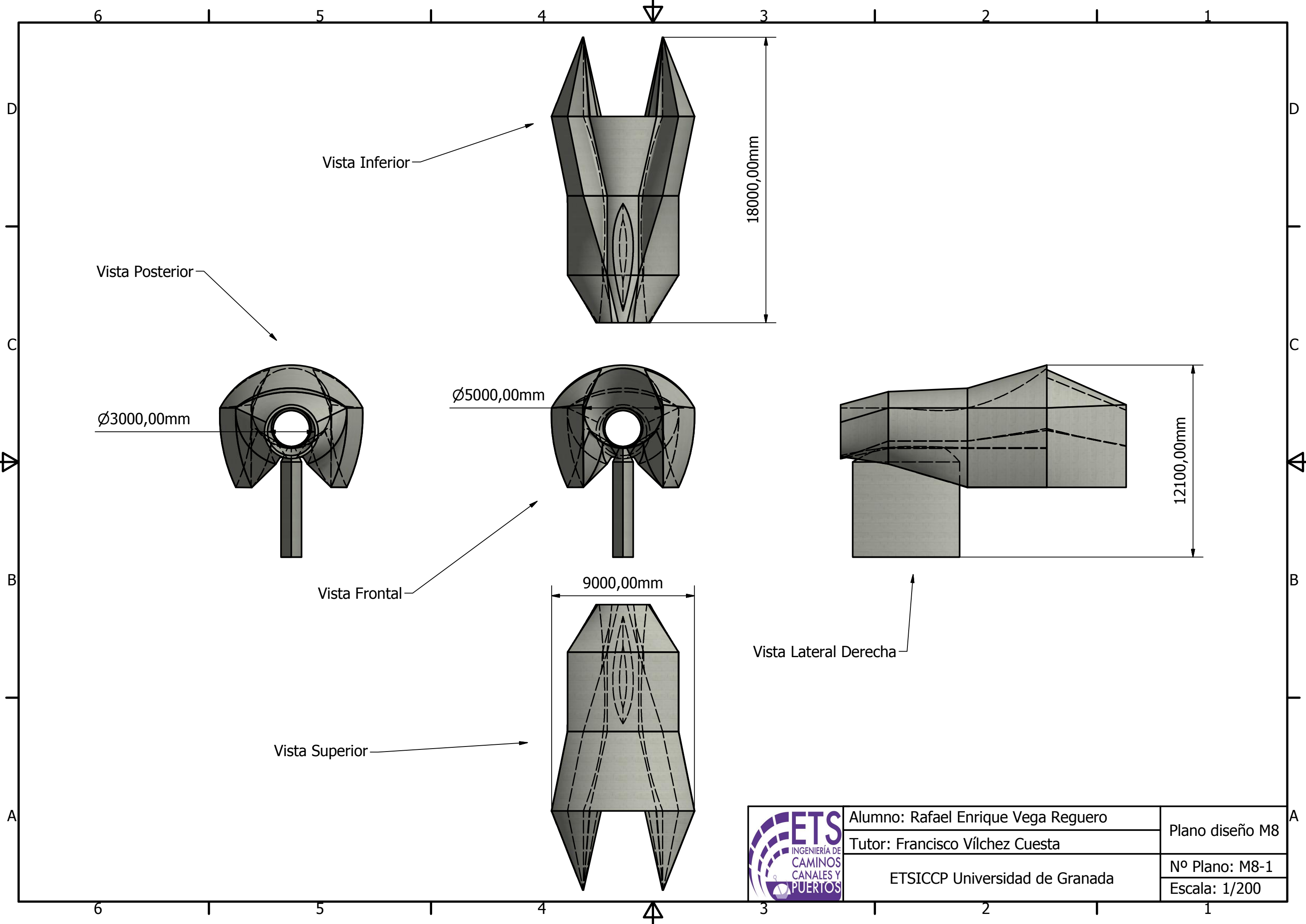
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M5
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M5-1
	Escala: 1/350



Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M6
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M6-1
	Escala: 1/200



Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M7
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M7-1
	Escala: 1/200



Vista Inferior

18000,00mm

Vista Posterior

Ø3000,00mm

Ø5000,00mm

Vista Frontal

9000,00mm

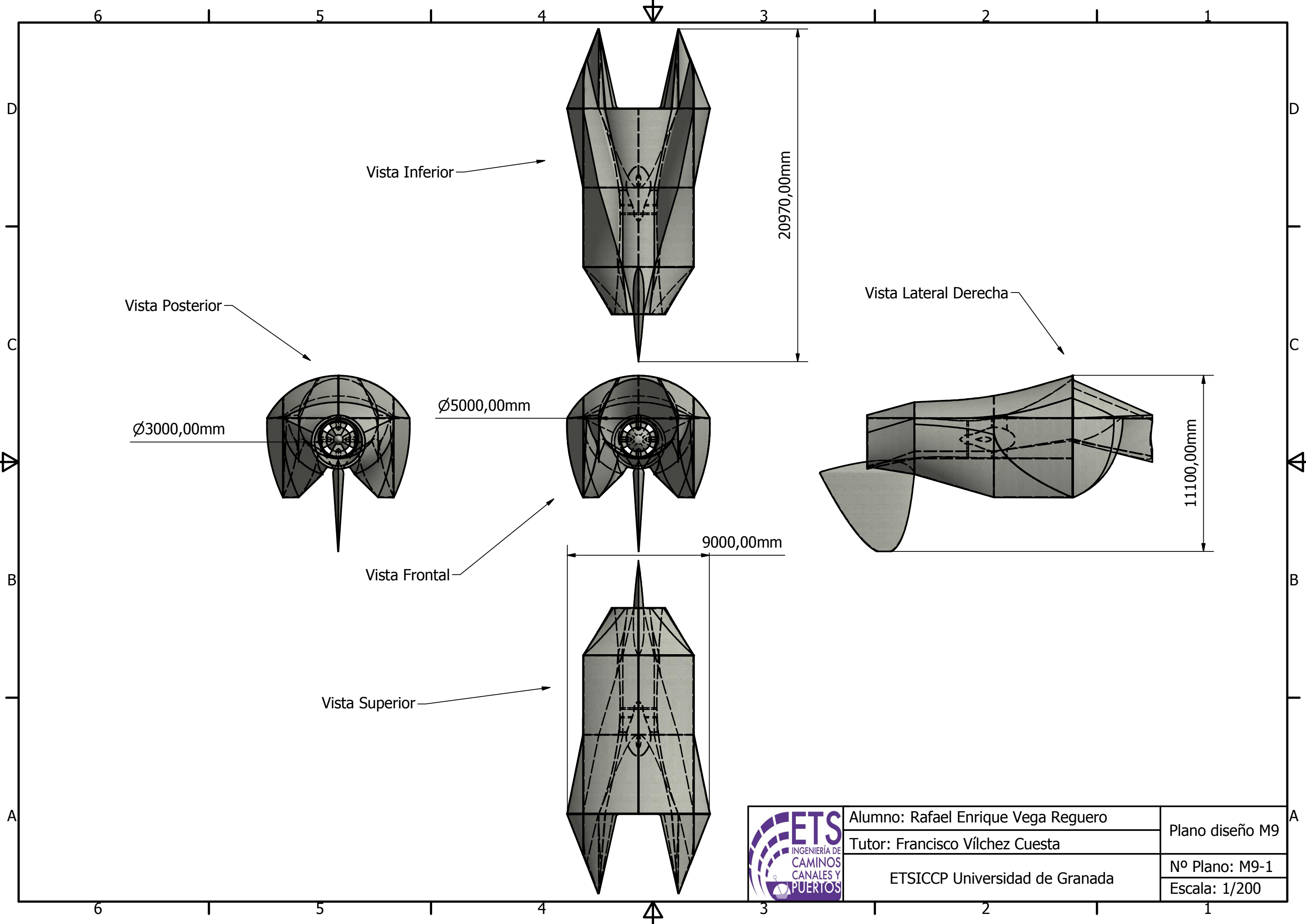
Vista Superior

Vista Lateral Derecha

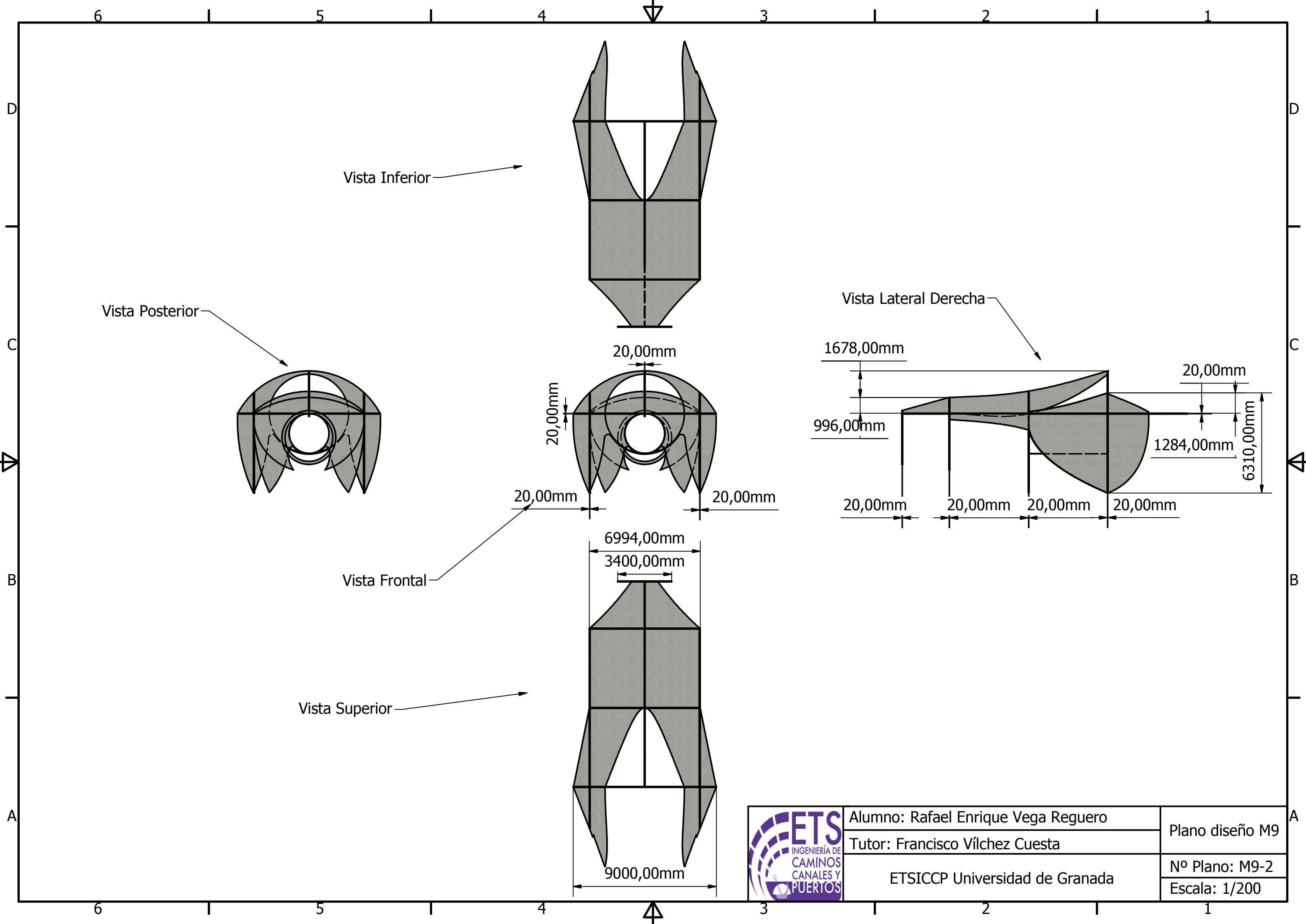
12100,00mm



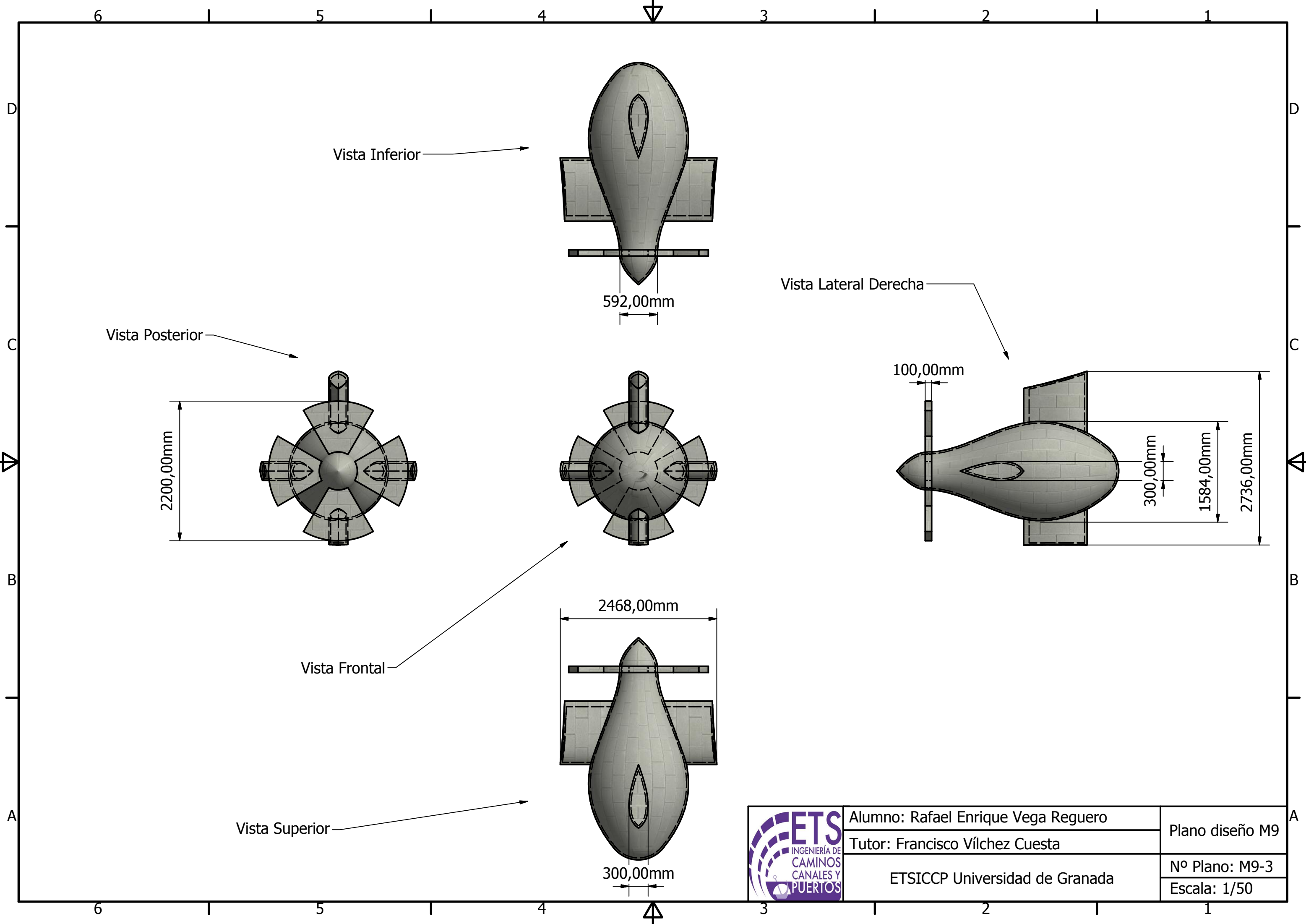
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M8
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M8-1
	Escala: 1/200



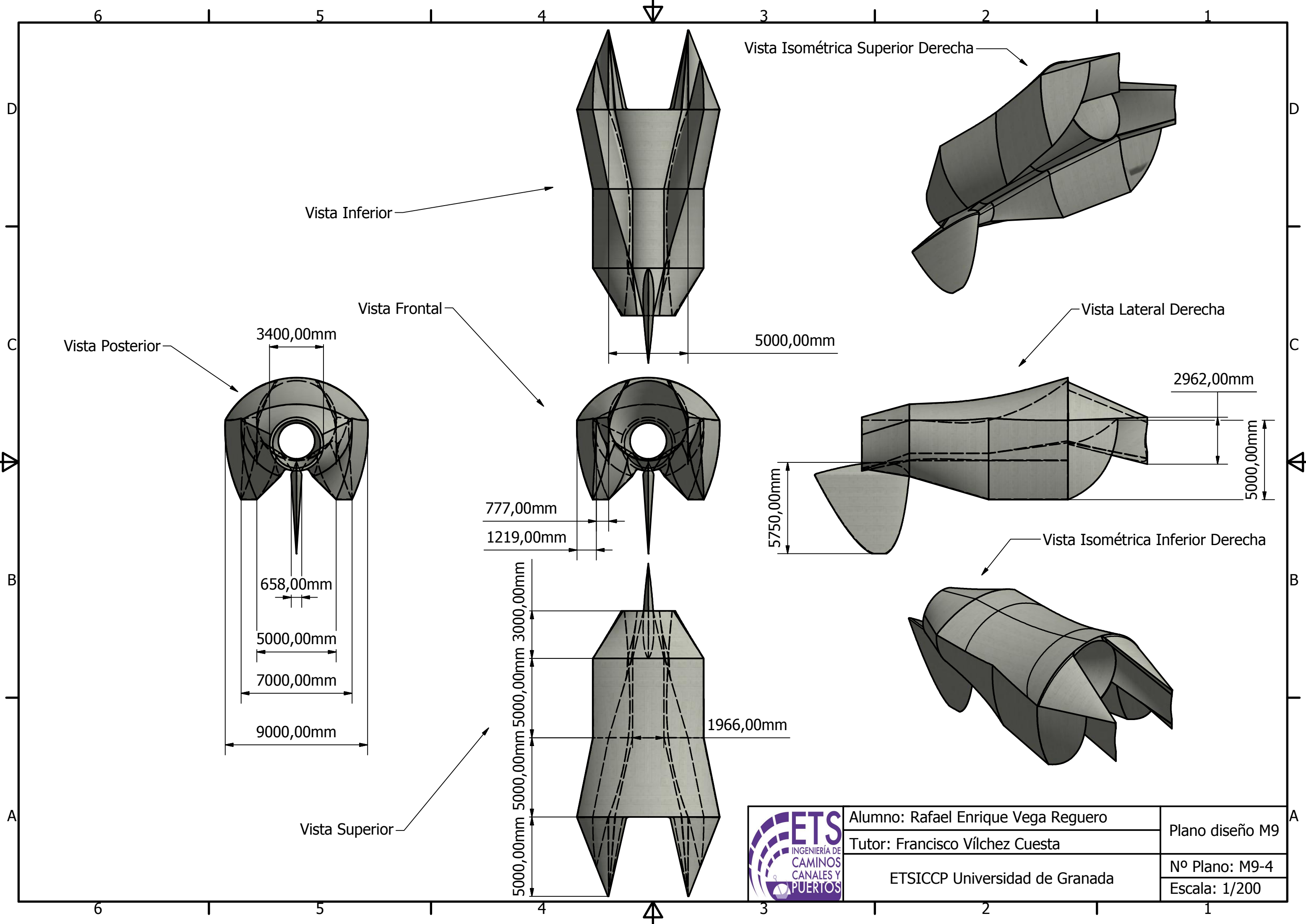
Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M9
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M9-1
	Escala: 1/200



Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M9
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M9-2
	Escala: 1/200



Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M9
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	Nº Plano: M9-3
	Escala: 1/50



Alumno: Rafael Enrique Vega Reguero	Plano diseño M9
Tutor: Francisco Vílchez Cuesta	
ETSICCP Universidad de Granada	
	Nº Plano: M9-4
	Escala: 1/200