

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño e Implementación de un Propulsor Eléctrico
de Bajo Costo**

Santiago Gerardo Robayo Tipán

Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 16 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Diseño e Implementación de un Propulsor Eléctrico de Bajo Costo

Santiago Gerardo Robayo Tipán

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

**Ing. Carlos Andrade
Marco León, M.Sc**

Firma del profesor:

Firma del profesor:

Quito, 16 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Santiago Gerardo Robayo Tipán

Código: 00124018

Cédula de identidad: 172233488-3

Lugar y fecha: Quito, 16 de diciembre de 2019

RESUMEN

Este proyecto abarca el diseño, la construcción y pruebas para la implementación de un propulsor de bajo costo que puede ser sumergido en agua. Al ser un equipo modular, puede ser fácilmente instalado en un vehículo que necesite ser propulsado, con necesidades de inmersión o sobre el nivel de agua, para ser controlado por radio frecuencia o de forma inalámbrica, con especial énfasis en la comparación del propulsor de bajo costo con respecto al propulsor SeaBotix diseñado por Teledyne Marine. A partir de los requerimientos presentados por el cliente se establecen los siguientes parámetros comparativos: precios, dimensiones, empuje y número de álabes. Se presenta el modelo digital y resultados de simulación realizado en SolidWorks 2017, a partir del cual se manufactura el prototipo para verificar los parámetros de comparación entre los dos modelos. Después de haber sellado el motor eléctrico, se obtiene un prototipo capaz de ser sumergido completamente en agua, con dimensiones de longitud 17 cm y dos módulos adicionales para montaje de motor eléctrico de 5 cm y 7 cm, 23 N de empuje obtenido por simulación computarizada y una hélice de 3 álabes.

Palabras clave: Propulsor, Comparativa, Sumergible, Motor Brushless, Modular.

ABSTRACT

This project covers the design, construction and testing for the implementation of a low-cost thruster that can be submerged in water. Being a modular equipment, it can be easily installed in a vehicle that needs to be propelled, with immersion needs or above the water level, to be controlled by radio frequency or wirelessly, with special focus on comparing the low propeller cost with respect to the SeaBotix Thruster designed by Teledyne Marine. The following comparative parameters are established based on the requirements presented by the client: prices, dimensions, thrust and number of blades. The digital model and simulation results performed in SolidWorks 2017 are presented, from which the prototype is manufactured to verify the comparison parameters between the two models. After the electric motor has been sealed, a prototype capable of being completely submerged in water is obtained, with dimensions of length 17 cm and two additional modules for mounting of electric motor of 5 cm and 7 cm, 23 N of thrust obtained by simulation and a propeller of 3 blades.

Key words: Thruster, Comparative, Submersible, Brushless Motor, Modular.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS.....	11
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	11
METODOLOGÍA.....	12
Requerimientos del producto.....	13
Diseño conceptual	13
Modelado y análisis del modelo	13
Verificación e integración	13
Validación del sistema.....	14
OPCIONES DE DISEÑO.....	15
Alternativa 1	15
Alternativa 2	16
SELECCIÓN DE MATERIAL.....	19
Cálculos.....	20
SIMULACIÓN: ANÁLISIS DE DINÁMICA DE FLUIDOS.....	24
Presupuesto.....	27
OPERACIONES DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	28
Seguridad en el diseño.....	30
CARACTERÍSTICAS DEL PROPULSOR.....	31
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	33
1. Armado	33
2. Limpieza e Inspección.....	36
3. Problemas y Posibles Soluciones	36
4. Indicaciones de Seguridad.....	37
5. Operación del Producto	37
6. Herramientas e Insumos para Ensamblaje y Cuidado Del Dispositivo.....	38
TRABAJO A FUTURO	39

Conclusiones	40
Referencias bibliográficas	43
Anexo A: Material audiovisual del proyecto.....	44
Anexo B: PLANO DE CONJUNTO	1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de actividades para implementación de propulsor de bajo costo	11
Tabla 2. Materiales para prototipado	19
Tabla 3. Presupuestos de materiales	27
Tabla 4. Propulsor: Características de diseño.....	31
Tabla 5. Costo de materiales para prototipado	40
Tabla 6. Tabla comparativa Propulsor de Seabotix vs. Propulsor construido.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de diseño colaborativo (Mcharek et al., 2019)	12
Figura 2. Cuerpo - Alternativa 1.....	15
Figura 3. Boquilla - Alternativa 1.....	15
Figura 4. Hélice - Alternativa 1	16
Figura 5. Cuerpo - Alternativa 2.....	16
Figura 6. Boquilla - Alternativa 2.....	17
Figura 7. Hélice - Alternativa 2.....	17
Figura 8. Sujetador de motor	20
Figura 9. Barra con fuerza puntual en extremo y fija en el extremo opuesto.....	21
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre.....	21
Figura 11. Cortante máximo en la barra.....	22
Figura 12. Momento máximo en la barra	22
Figura 13. Perfil de velocidad dentro del propulsor	25
Figura 14. Perfil de presión dentro del propulsor.....	25
Figura 15. Empuje obtenido durante la simulación.....	26
Figura 16. Esquema de operaciones de construcción.....	28
Figura 17. Impresión 3D - Cuerpo del propulsor	29
Figura 18. Vista explosionada de la ubicación de piezas, referencial	30
Figura 19. Vista frontal del propulsor	31
Figura 20. Vista lateral del propulsor.....	32
Figura 21. Vista inferior del propulsor	32
Figura 22. Vista explosionada del modelo	33
Figura 23. Cuerpo del propulsor.....	33
Figura 24. Hélice	34
Figura 25. Soporte de motor eléctrico	34
Figura 26. Boquilla.....	35
Figura 27. Prototipo armado con soporte adicional de motor	36

INTRODUCCIÓN

En el mercado actual, es posible encontrar propulsores que cuentan con motores eléctricos por su alta eficiencia y la facilidad con la que se puede integrar a sistemas que requieran impulso (Carlton & Carlton, 2019), pero al tener aplicaciones sumergidas (en agua) los precios se elevan considerablemente por la necesidad de encapsulamiento de los componentes eléctricos. Es así que este proyecto busca conseguir la implementación de un propulsor de bajo costo que pueda ser controlado remotamente (Macreadie et al., 2018), que cuente con un motor eléctrico *brushless*, dimensionalmente comparable con un motor *Seabotix thruster*, capaz que alimentar características de potencia, fácil integración, con un bajo costo para la protección de sus componentes eléctricos y tenga una construcción duradera. Para esto se aplicará metodología de diseño, donde se cumplirá con los parámetros de requerimiento para trabajar en un medio acuático, basado en un diseño inicialmente conceptual, con modelado y análisis de modelo (CAD/CAE), construcción y terminando con la validación del sistema. (Mcharek, Hammadi, Azib, Larouci, & Choley, 2019)

Este proyecto busca una opción de diseño de bajo costo, en donde se promueva el desarrollo de tecnología en el país, obteniendo productos que cumplan con las expectativas necesarias para su implementación y completamente funcionales. Al ser un dispositivo de fácil integración, puede ser usado para diferentes aplicaciones que requieran de sumersión acuática, como son pequeños barcos, paddle boards, kayaks y mini-submarinos de exploración, con capacidad de ser controlado de manera remota.

Dentro del mercado actual es posible encontrar propulsores con motor eléctrico para sumersión acuática, con capacidad de integración en otros sistemas (modulares) a precios superiores a los \$ 1,100.00 USD en los Estados Unidos (Bixpi), si se requiere ingresar al país el costo de uno de estos propulsores podría elevarse al menos en un 50%, considerando los

valores de movilización e impuestos para ingreso de este tipo de elementos, siendo valores considerablemente altos para el ecuatoriano promedio. (Vallejo Bejarano, 2016)

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar e implementar un propulsor eléctrico de bajo costo, dimensionalmente comparable con el motor Seabotix Thruster.

Objetivos específicos

- Acondicionar un motor eléctrico Brushless para que pueda ser sumergido en agua.
- Implementación de un modelo de propulsor de bajo costo dimensionalmente comparable con el motor Seabotix Thruster
- Realizar la comparación del propulsor versus la instalación de una salida tipo water-jet

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Para la implementación de este proyecto se presenta el siguiente cronograma de actividades a cumplir:

Tabla 1. Cronograma de actividades para implementación de propulsor de bajo costo

ACTIVIDAD	SEPTIEMBRE					OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE			
	13	16	19	23	26	4	7	10	22	12	19	28	29	3	5	18	22
Perfil del proyecto	■																
Parámetros para diseño	■	■	■														
Selección de elementos eléctricos			■	■	■	■											
Selección de materiales para prototipado					■	■	■	■	■								
Comprobación de funcionamiento								■	■	■	■						
Comparativa con motor SeaBotix										■	■	■					
Presentación para la feria													■	■			
Presentación final														■	■		

METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolla bajo la metodología de diseño, es así que se considera un proceso secuencial; iniciando a partir de la generación de requerimientos para el producto definidos por el cliente y el medio donde se desempeñará el producto, de donde se basarán los criterios ingenieriles para el diseño, modelado y composición de ideas, con base en el conocimiento de Ingeniería Mecánica y en este caso, también acompañada de información de tecnología e Ingeniería Eléctrica; finalizando con la validación del producto. A continuación, se detalla un diagrama con el proceso a seguir en el que se destacan cinco fases: 1. Requerimientos del producto, 2. Diseño conceptual, 3. Modelado y análisis del modelo, 4. Verificación e integración y 5. Validación del sistema. (Mcharek et al., 2019)

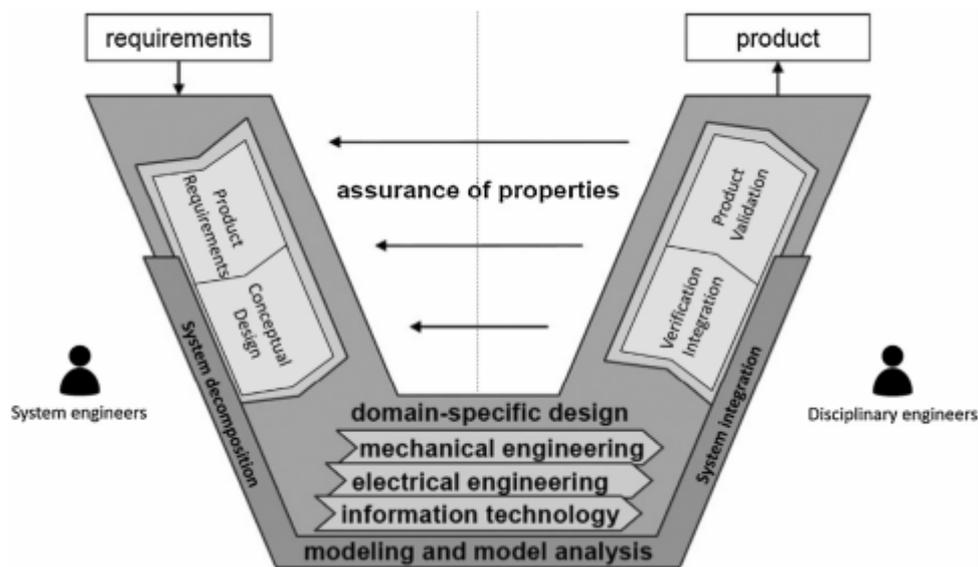


Figura 1. Proceso de diseño colaborativo (Mcharek et al., 2019)

Requerimientos del producto

Para el diseño del propulsor se considera:

- Diseño modular
- Capaz de ser sumergido en un medio acuoso
- Prototipo que cuente con dimensiones similares a propulsor de Seabotix
- Propulsado mediante un motor eléctrico brushless
- Bajo costo
- Salida de agua tipo Water-Jet

Diseño conceptual

En esta sección se considera el diseño conceptual para el acoplamiento y propulsor, en donde se evalúan los requerimientos de diseño, en conjunto con su aplicación para conseguir una configuración esencial para que el producto final sea funcional.

Modelado y análisis del modelo

Para el segmento de modelado se usa el software SolidWorks en donde se conforman cada una de las partes necesarias para la construcción y se procede a un ensamblaje digital del prototipo. Después de obtener el ensamble final se realiza un estudio de análisis de dinámica de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) y un estudio de carga al modelo para verificar el comportamiento teórico que tendría al ponerla en su entorno de funcionamiento.

Verificación e integración

En esta sección, se verifica los resultados obtenidos en el análisis asistido por computadora. Para esto se realiza la construcción de un prototipo inicial que cumpla con los requerimientos del producto detallados en la primera sección considerando las configuraciones básicas para que el diseño cumpla con el desempeño deseado.

Validación del sistema

Finalmente se realizan pruebas de funcionamiento para determinar los rangos de funcionamiento del producto, para esto se consideran los siguientes puntos:

- Verificar las dimensiones en el prototipo final
- Verificar que el modelo sea modular
- Verificar que el motor eléctrico tenga capacidad de funcionamiento sumergido en agua
- Verificar el empuje generado
- Capacidad de inmersión del prototipo

OPCIONES DE DISEÑO

Para el desarrollo de este proyecto se evalúan dos opciones de diseño, considerando que se cumplan los objetivos: general y específicos, donde se evalúan las mejores características de cada uno para la implementación del prototipo final.

Alternativa 1

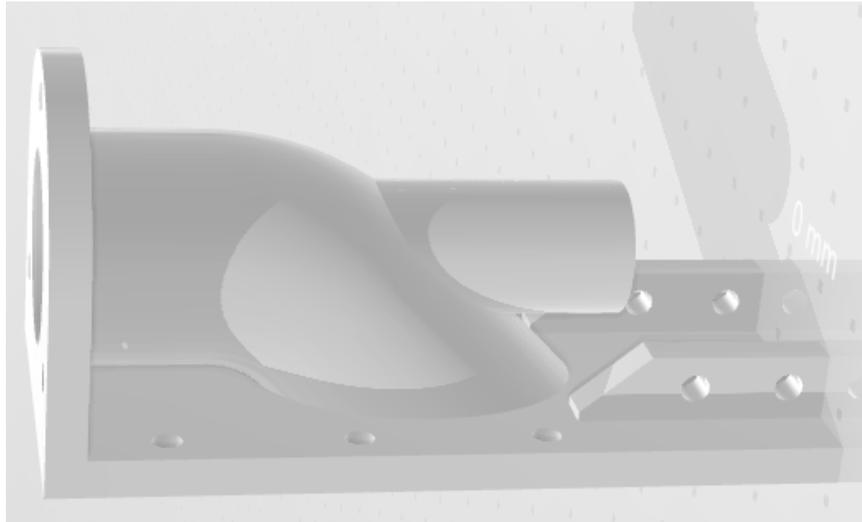


Figura 2. Cuerpo - Alternativa 1

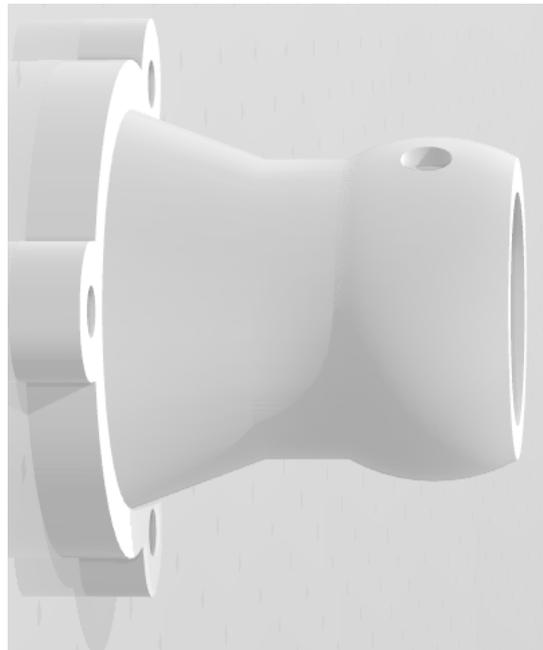


Figura 3. Boquilla - Alternativa 1



Figura 4. Hélice - Alternativa 1

Alternativa 2

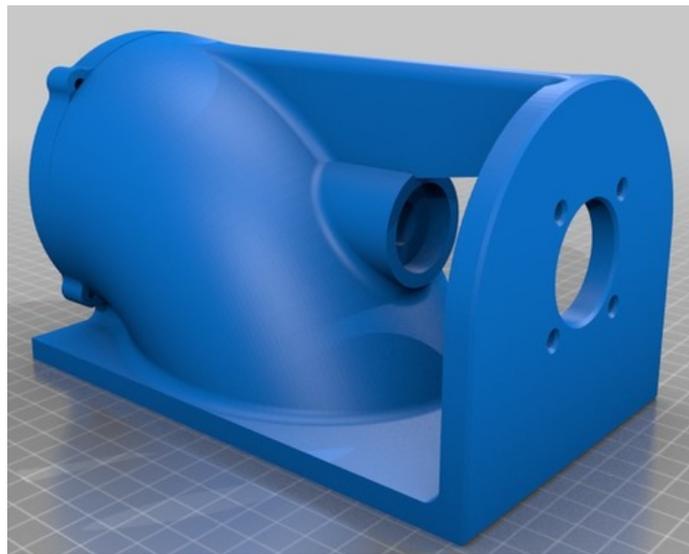


Figura 5. Cuerpo - Alternativa 2

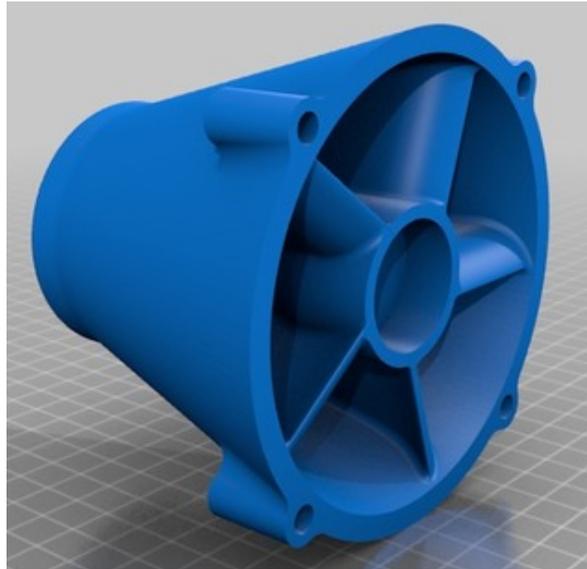


Figura 6. Boquilla - Alternativa 2

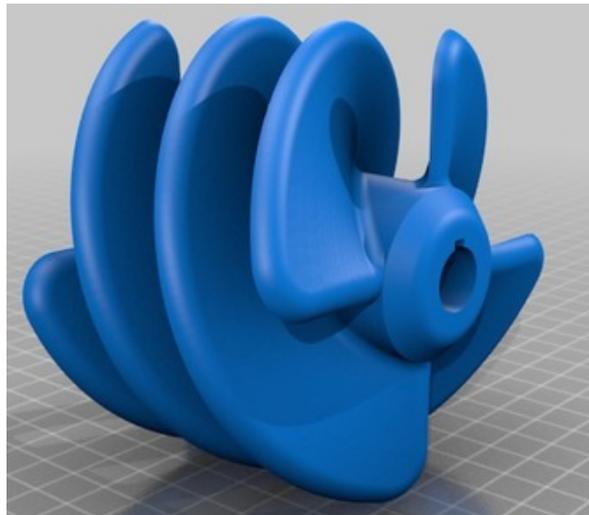


Figura 7. Hélice - Alternativa 2

Las alternativas presentadas, cuentan con 3 elementos estándar que son el cuerpo, la hélice y la boquilla de tipo *water-jet*, parte esencial dentro de los requerimientos expuestos por el cliente, de los cuales se extraerán las características más representativas para obtener el modelo final para el prototipo y se exponen a continuación:

Cuerpo

- Ingreso de agua hacia la hélice a 45°
- Conjunto plano en el ingreso para adaptación en diferentes aplicaciones

- Agujeros en el contorno para adaptación de módulos adicionales

Hélice

- Estructura con ingreso de agua redondeado
- Inicio de álabe en forma de cuchilla (para ingreso de agua)
- 3 álaves

Boquilla

- Salida de agua con carrera múltiple: segmentada por paredes, sin segmentación
- Salida con disminución de diámetro de hasta el 20%
- Junta tipo brida empernada

SELECCIÓN DE MATERIAL

El PLA es el material principal que va a hacer usado en la construcción de este prototipo, dadas las facilidades que brinda la impresión tridimensional para la fabricación de piezas. A continuación, se enlistan los materiales usados acompañados de una breve descripción de cada uno.

Tabla 2. Materiales para prototipado

Material	Descripción
PLA	Filamento de ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) de 1.75 mm de diámetro para extrusión en impresoras 3D. Propiedades del material: Módulo de elasticidad 2346.5 Mpa Temperatura de fusión: 145 - 160 °C Densidad: 1.25 g/cm ³ (Liu, Lei, & Xing, 2019)
PVC	El cloruro de polivinilo es el material de fabricación de ciertas tuberías. Propiedades del material: Densidad: 1.37 - 1.42 Kg/dm ³ Módulo de elasticidad a 20°C: 28000 kg/cm ² (Elaplas, n.d.)
AISI 304	Acero inoxidable, con alta resistencia a la corrosión. Eje para transmisión de movimiento del motor eléctrico a la hélice. Propiedades del material: Resistencia a la tracción: 54 Kg/mm ² Resistencia a la cedencia: 21 Kg/mm ² (Bohman, n.d.)

CÁLCULOS

Para una obtención óptima del modelo, dentro de las etapas de diseño, es necesario dimensionar de manera adecuada el prototipo, principalmente el espesor de las paredes, que van a resistir la presión del agua y la fuerza generada por componentes como el motor.

El esfuerzo al que van a estar expuestos los componentes se puede resumir a una barra flexionada por una fuerza puntual ejercida en el extremo y fijo en el extremo opuesto como se muestra en la figura. Los diagramas de esfuerzo fueron obtenidos en la aplicación SkyCiv online.

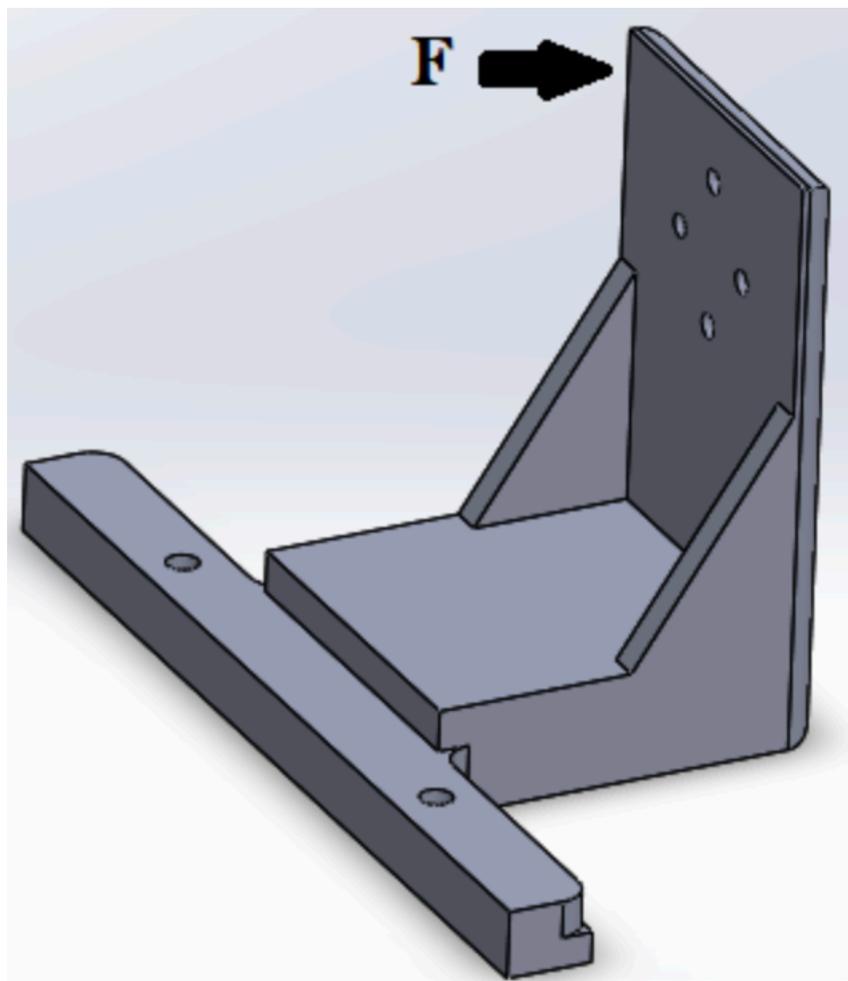


Figura 8. Sujetador de motor

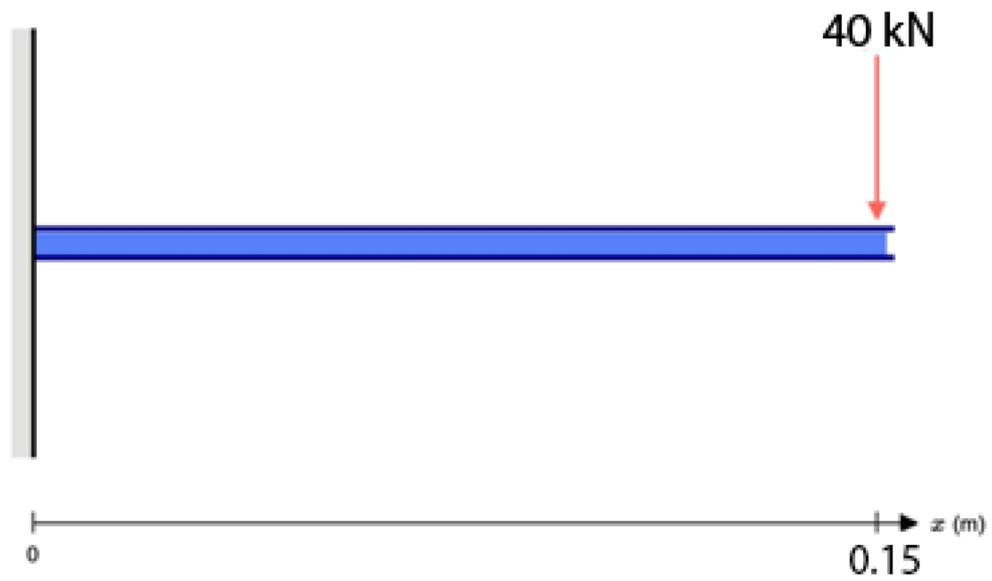


Figura 9. Barra con fuerza puntual en extremo y fija en el extremo opuesto



Figura 10. Diagrama de cuerpo libre



Figura 11. Cortante máximo en la barra

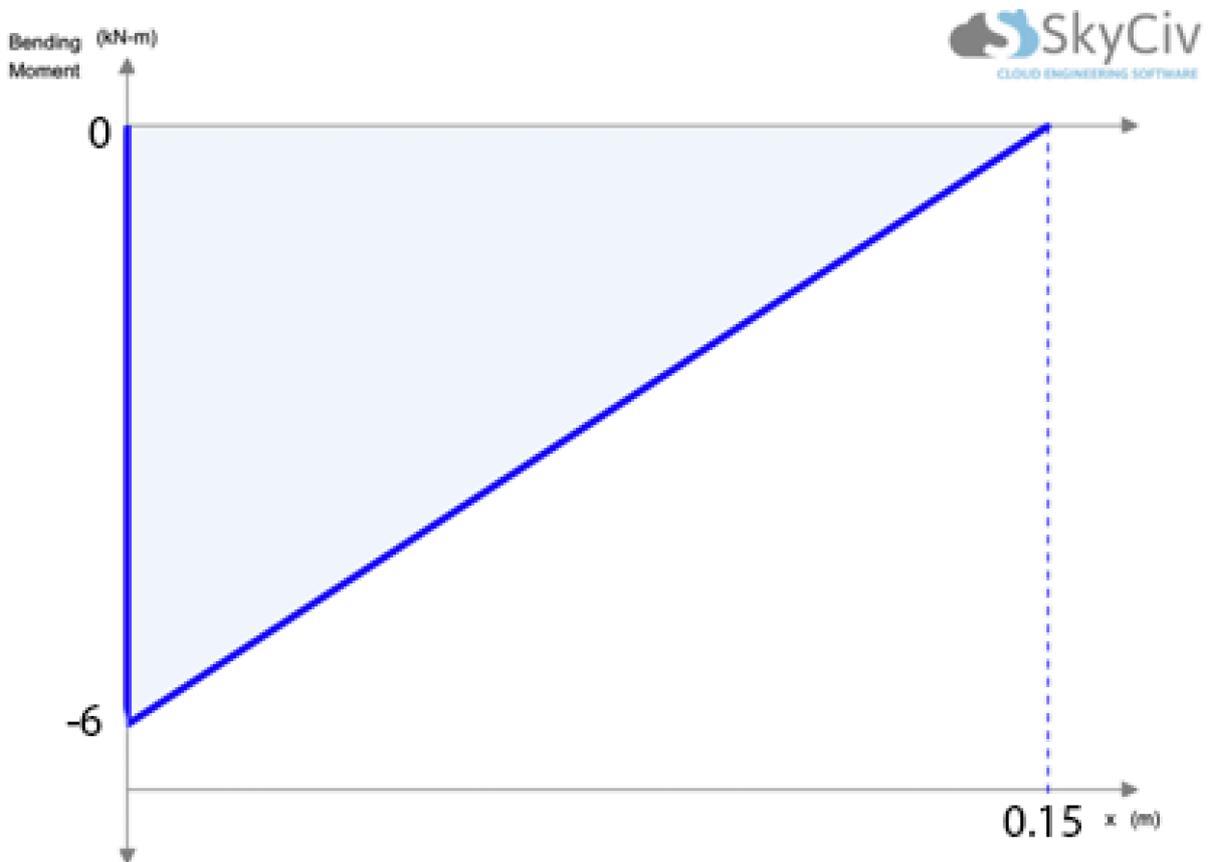
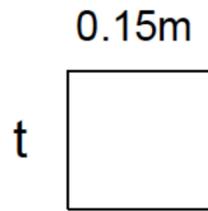


Figura 12. Momento máximo en la barra



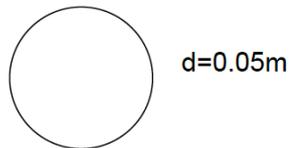
$$\sigma_x = \frac{M}{I/c} = \frac{6t}{\frac{1}{12}(0.15)t^3} = \frac{480}{t^2}$$

$$\sigma' = \sigma_x$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$t = \sqrt{\frac{480 \times 1.5}{60 \times 10^6}} = 3.46 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Adicional, se obtiene el empuje teórico para la salida de agua dimensionada.



$$A_{out} = \pi d^2 / 4$$

$$A_{out} = \pi(0.05)^2 / 4$$

$$A_{out} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$T = \rho A_{out} U_{out}^2$$

$$T = (1000)(1.96 \times 10^{-3})(20^2)$$

$$T = 49 \text{ N}$$

SIMULACIÓN: ANÁLISIS DE DINÁMICA DE FLUIDOS

Después de haber generado el diseño por computadora del prototipo a implementar, se propone el Análisis de Dinámica de Fluidos para comprobar cómo se va a comportar el modelo bajo condiciones controladas.

Para obtener resultados más cercanos posibles al comportamiento real, es necesario fijar las condiciones que suplanten el ambiente en el cual el dispositivo va a desempeñarse. Dentro de las condiciones se considera lo siguiente:

- Al requerir generar un estudio de flujo interno, el software usado (SolidWorks) solicita generar tapas para cada una de las entradas, salidas o aberturas en el conducto a ser simulado.
- Después de generar las tapas se establecen las condiciones de borde, estableciendo la entrada y salida de agua como superficies de intercambio de presión.
- Es necesario establecer el dominio computacional, que en este caso envuelve por completo al conjunto a simular. El dominio emula el medio en el cual se va a desenvolver el prototipo
- Es posible establecer el mallado, con lo que se puede controlar el error proyectado en los resultados, que en general al aumentar la densidad de la malla se aproxima en mayor proporción el resultado obtenido a la realidad. En este parámetro, también es necesario considerar que al tener una mayor densidad de malla se requiere una mayor capacidad de procesamiento en el computador.
- Al establecer las metas de la simulación, se han escogido resultados sobre las superficies involucradas, ya que, al tener hélices, se busca la cantidad de fuerza que esta pueda generar al ser impulsada por el motor eléctrico.

Después de haber considerado los parámetros antes descritos se han obtenido los siguientes resultados:

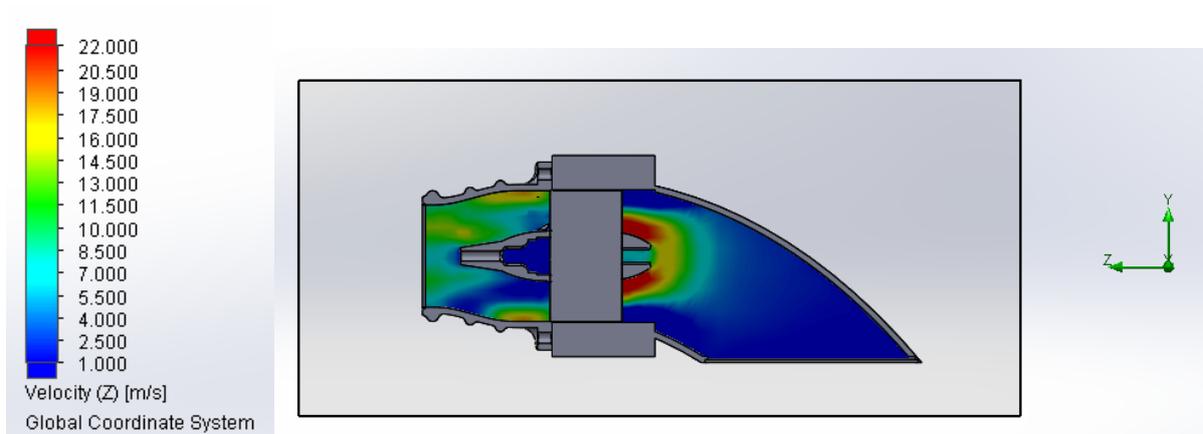


Figura 13. Perfil de velocidad dentro del propulsor

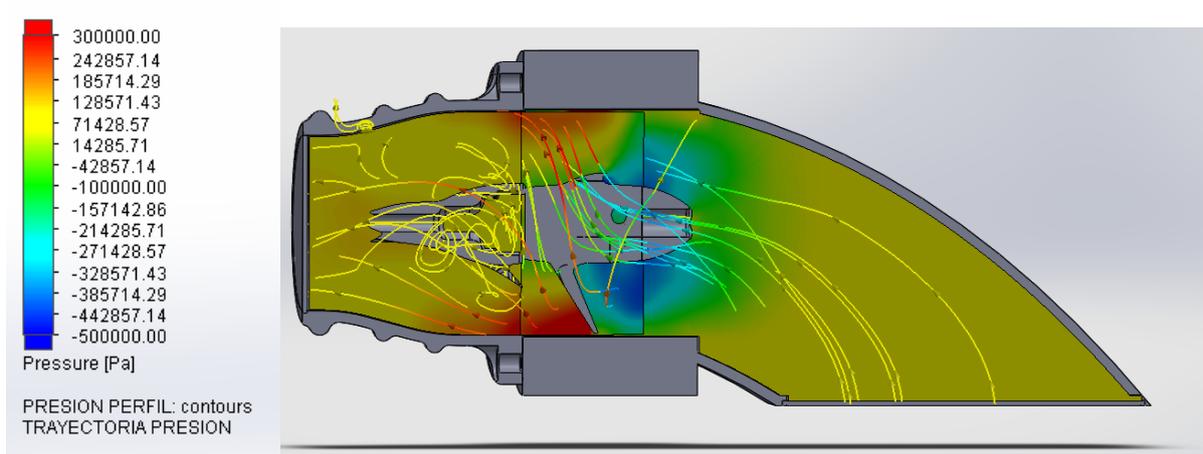


Figura 14. Perfil de presión dentro del propulsor

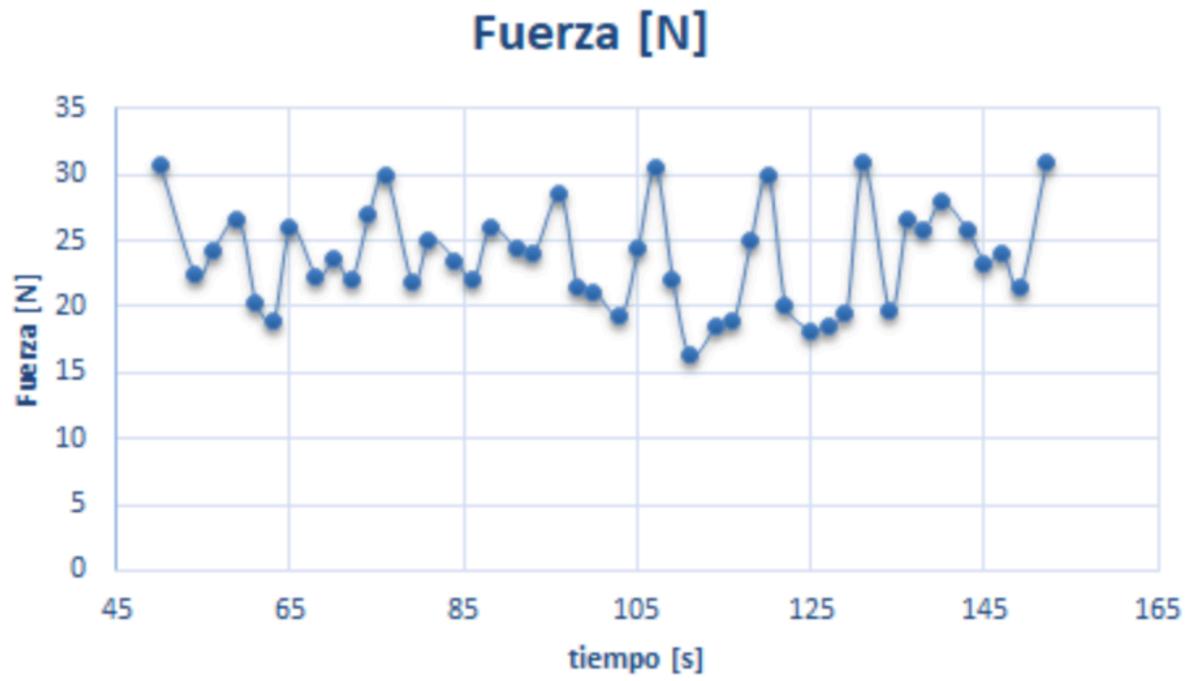


Figura 15. Empuje obtenido durante la simulación

PRESUPUESTO

Para la elaboración de este proyecto se presenta el siguiente presupuesto para gastos propuestos por materiales:

Tabla 3. Presupuestos de materiales

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
2	RESINA + AGLUTINANTE	25	50 USD
2	MOTOR BRUSHLESS	35	70 USD
1	PLA KILO	45	45 USD
1	SPEED CONTROLLER	20	20 USD
1	KIT CONECTORES ELECTRICOS	20	20 USD
		TOTAL	205 USD

Adicional a esto se considera \$ 20.00 por costo de un eje de 8mm de diámetro maquinado para ajustarlo entre dos rodamientos con un costo de \$ 5.00 cada uno. Además, es posible añadir un costo por impresión de material avalado en \$ 0.40 cada hora (suman 6 horas de impresión).

OPERACIONES DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

Los procesos que se cumplieron para la construcción del prototipo se separan en dos operaciones: formado y acabado.



Figura 16. Esquema de operaciones de construcción

La construcción del prototipo principalmente se llevó mediante adición de material, usando PLA extruido en una impresora 3D, finalizando este proceso después de 6 horas. A la par se llevó a cabo el encapsulamiento del motor eléctrico, que cumplió con los siguientes pasos para conseguir un completo aislamiento ante posibles cortocircuitos por inmersión:

- Se separan el rotor y estator, dejando al descubierto la bobina eléctrica.
- Se sellan los rodamientos superior e inferior del estator usando cera de vela, por la facilidad de remoción (fusión ocurre alrededor de 70°C).
- En la base agujerada prevista para paso de aire, se genera una cama con cinta adhesiva y sobre esto cera de vela
- Se envuelve con al menos dos capas de cinta adhesiva transparente el estator, asegurando que se cuente con una pared fija para el vertido de resina.
- Se vierte de forma regular y continua resina epoxi sobre la bobina, verificando que ingrese entre los cables.

- Es necesario repetir este paso hasta observar una capa fija sobre el estator, logrando un recubrimiento completo
- Al finalizar el curado, se retira las paredes de cinta y la cera puesta para cubrir los rodamientos, de ser necesario se puede calentar para retirar sobrantes de cera.



Figura 17. Impresión 3D - Cuerpo del propulsor

Al concluir el encapsulamiento del motor y la impresión 3D, se insertan dos rodamientos en la línea guía del cuerpo del propulsor, de 8mm de diámetro interno, y en conjunto se fija el eje. Es necesario insertar la hélice en el eje, ubicando la cara plana contra la cara interna de la boquilla. Es necesario instalar la pieza de montaje del motor en la parte posterior del cuerpo del propulsor, en conjunto con el motor sujeto con pernos y añadir la junta entre ambos ejes para permitir la transmisión de movimiento. Para finalizar, se fijan los pernos de la brida formada por el cuerpo del propulsor y la boquilla.

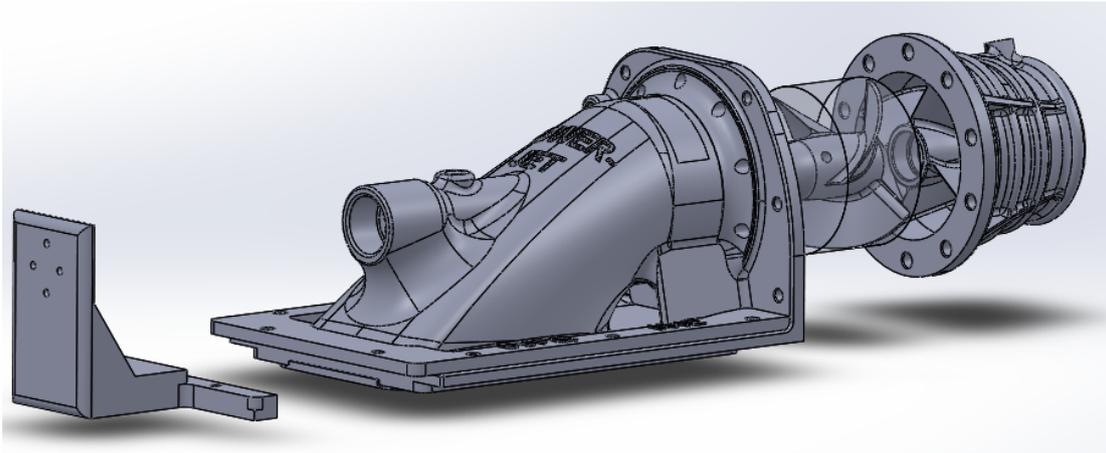


Figura 18. Vista explosionada de la ubicación de piezas, referencial

SEGURIDAD EN EL DISEÑO

Para la implementación de este proyecto se aplicaron criterios de ingeniería acorde a las necesidades de funcionalidad del prototipo, es así, que se plantea dentro de los cálculos de dimensionamiento del producto un factor de seguridad de 1.5, para efectivizar la durabilidad y reducir el impacto por efecto de agentes externos al producto, no identificados dentro de las consideraciones iniciales. Además, se considera un segmento de protección eléctrica donde se usa un controlador modulado (speedcontroller) para evitar ruido en la transmisión de señal al momento de operar el motor brushless, ya que este impulsa de manera continua a la hélice a velocidades superiores a 10 000 rpm, generando cortes para evitar el sobrecalentamiento o sobrecargas en el sistema, afianzando la seguridad en la operación del producto.

CARACTERÍSTICAS DEL PROPULSOR

Tabla 4. Propulsor: Características de diseño

Parámetro	Valor
Peso	1.35 libras
Longitud	17 cm fijos desde la salida del jet a lugar donde se fija el soporte de motor
Longitud Adicional	7 cm para soporte de motor de 950 KV 5 cm para soporte de motor 1020 KV
Hélice	De 3 cuchillas
Material principal de construcción	PLA

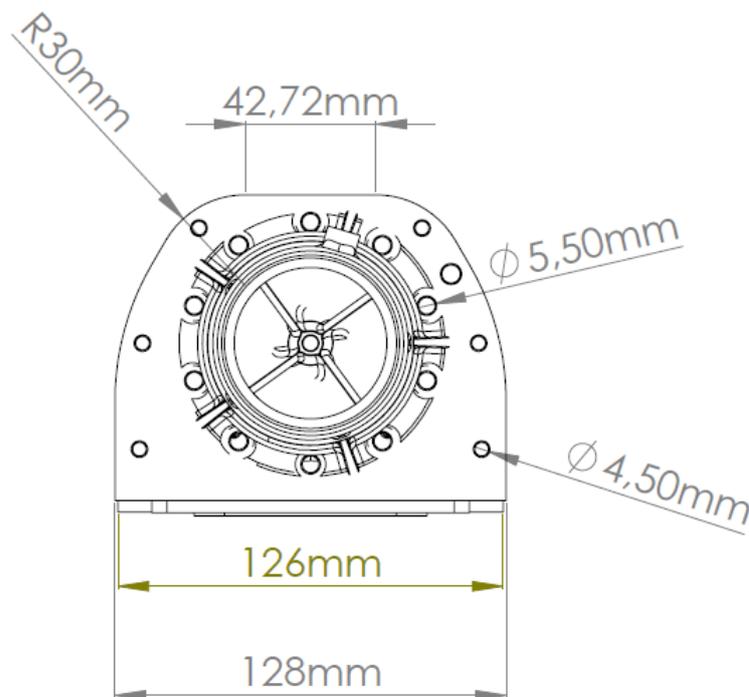


Figura 19. Vista frontal del propulsor

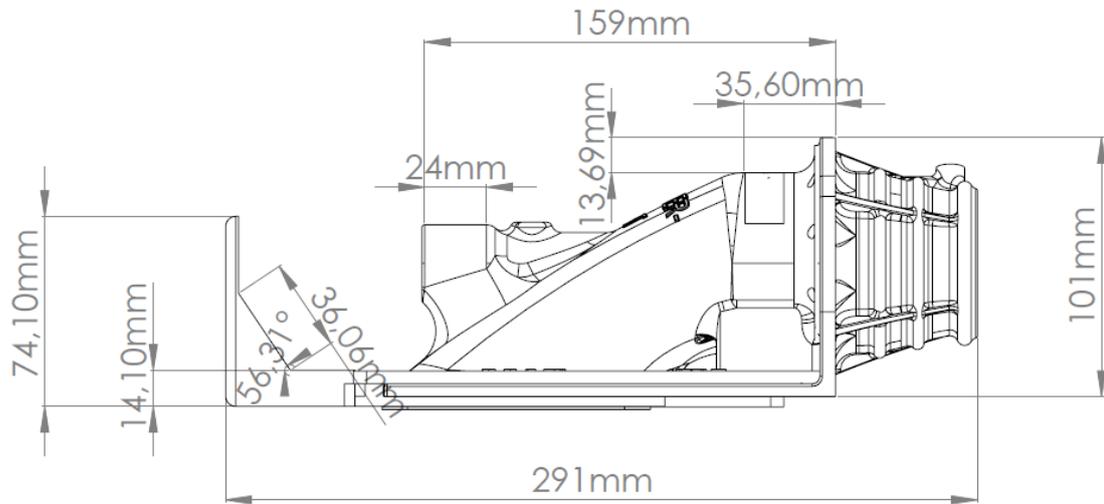


Figura 20. Vista lateral del propulsor

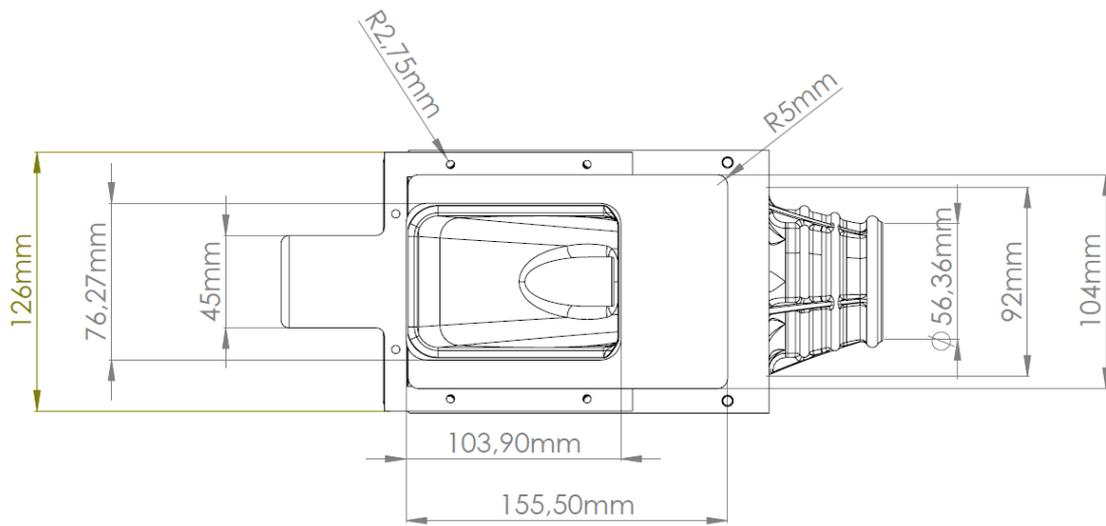


Figura 21. Vista inferior del propulsor

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Propulsor Eléctrico

1. Armado

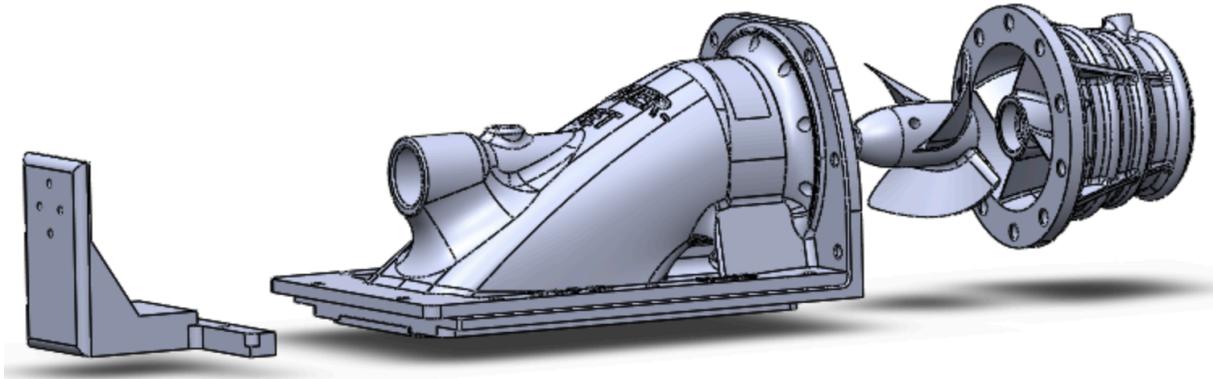


Figura 22. Vista explosionada del modelo

1. Insertar el eje principal en el cuerpo del propulsor, considerando que el rodamiento de soporte se encuentre en el orificio externo (1).

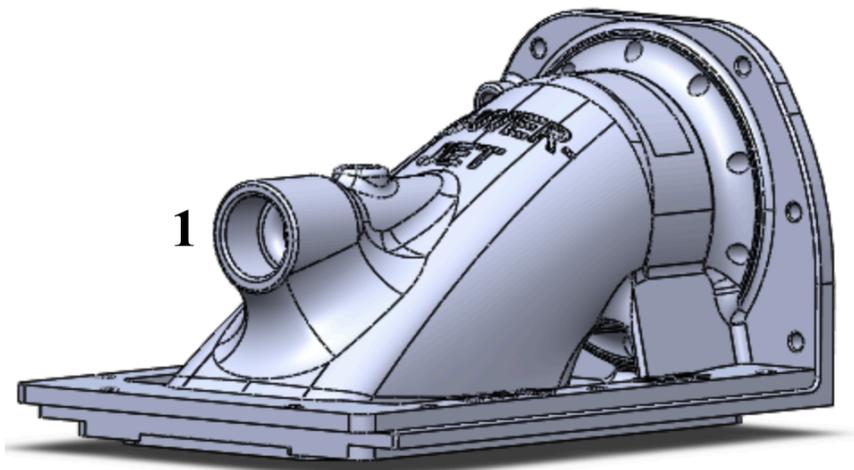


Figura 23. Cuerpo del propulsor

2. Introducir la hélice en el eje. Tener en cuenta que la parte plana de la hélice debe estar orientada hacia afuera, en dirección a la boquilla.

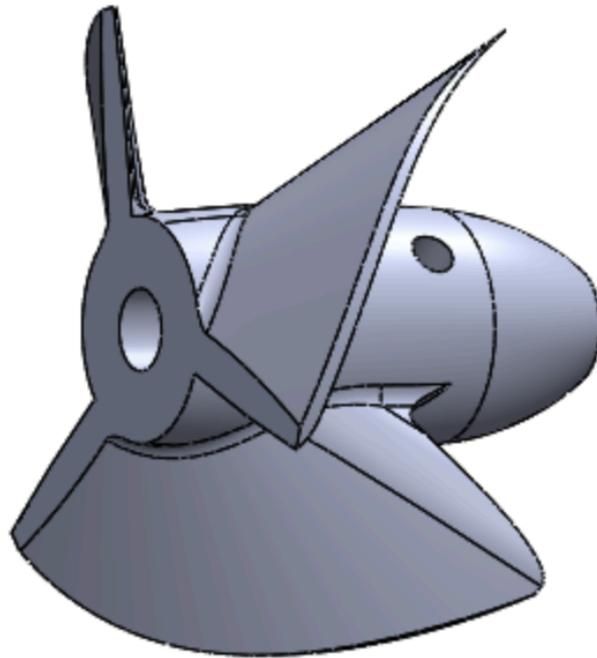


Figura 24. Hélice

3. Instalar la boquilla de salida de agua, introduciendo el eje en el rodamiento previamente insertado en el orificio de soporte para el final del eje.
4. Insertar el extremo que sobresale del eje a la unión prevista para el motor eléctrico.

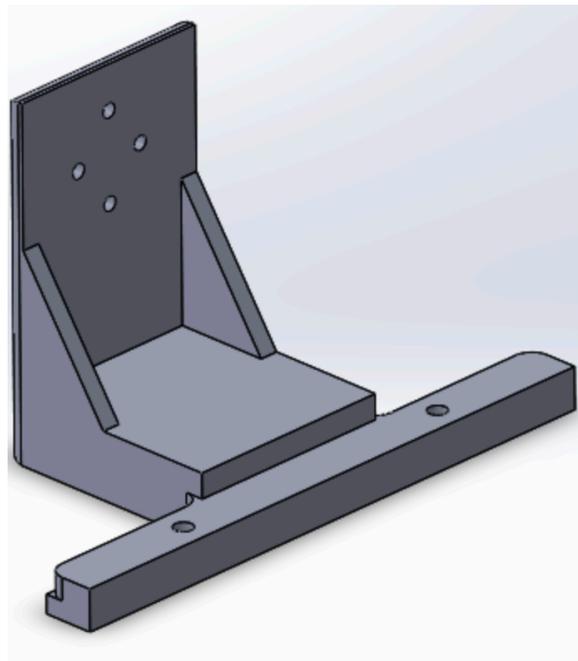


Figura 25. Soporte de motor eléctrico

5. Para escoger el soporte de motor, fijarse en la distancia entre el espacio sobrante de la unión y la base del soporte con el motor brushless instalado.
6. Para fijar el soporte del motor al cuerpo principal del propulsor se debe ajustar dos pernos allen proporcionados con sus respectivas tuercas ciegas.
7. Comprobar que existan al menos dos pares de pernos hexagonales ubicados de manera cruzada (en equis "X" 2-3-4-5) entre la boquilla de salida de agua y el cuerpo principal del propulsor, además de un perno adicional en la parte superior.

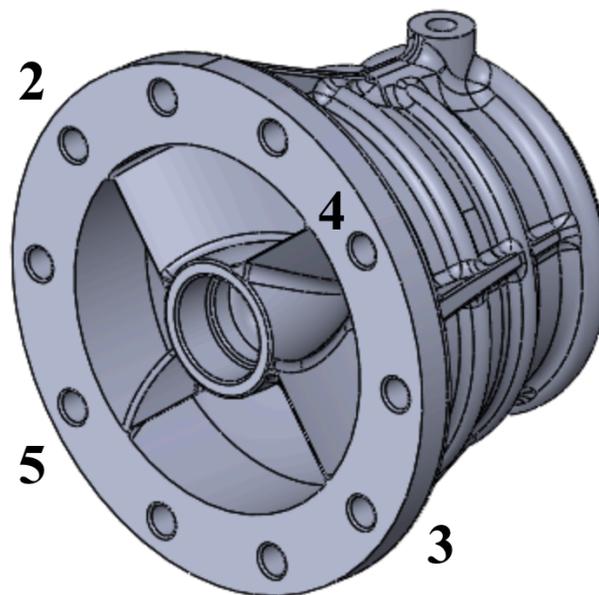


Figura 26. Boquilla

8. Verificar el ajuste de la unión entre el motor brushless y el eje, haciéndolos girar en conjunto con la mano.

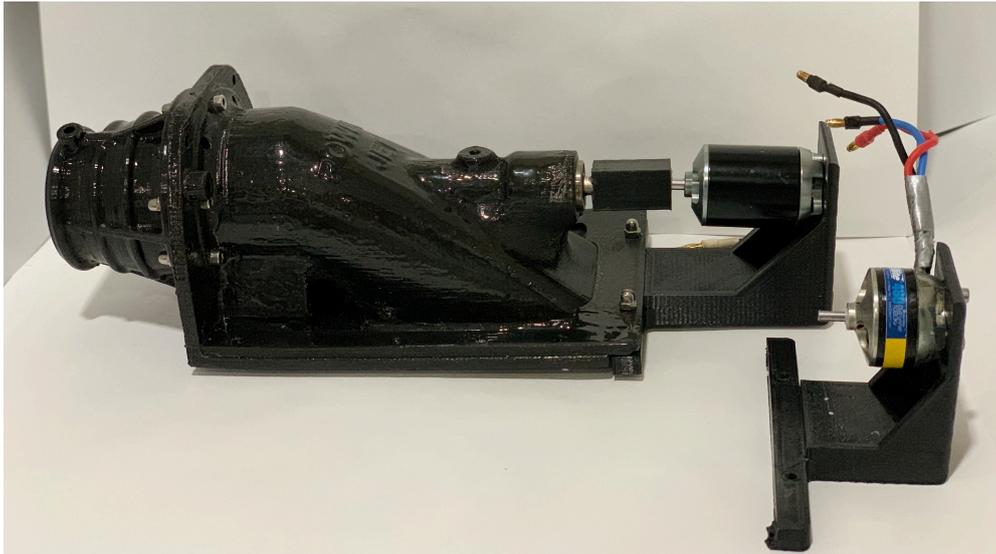


Figura 27. Prototipo armado con soporte adicional de motor

2. Limpieza e Inspección

Es necesario comprobar, antes de cada ciclo de uso, la funcionalidad de los rodamientos. Para esto, se sugiere mover el eje con la mano y comprobar la suavidad o posibles ruidos; de ser el caso, rociar con lubricante multiusos para conservar movimientos de transmisión con fricción reducida y aprovechar el máximo potencial del motor eléctrico.

Al terminar cada jornada de uso, limpiar con agua clara (potable de ser posible) para eliminar posibles agentes corrosivos o formaciones de algas o microorganismos que puedan afectar el funcionamiento normal del equipo.

Para finalizar, rociar con suficiente lubricante multiusos los elementos metálicos para prevenir corrosión.

3. Problemas y Posibles Soluciones

Entre los principales problemas que se puedan presentar en el propulsor se encuentra el desgaste de los rodamientos, al encontrarse entre los elementos que cumplen más ciclos dentro del funcionamiento normal del mecanismo. Para prevenir el desgaste prematuro es necesario mantener lubricado el sistema móvil, de ser necesario remover y cambiar ambos rodamientos.

La transmisión de movimiento del motor eléctrico al eje principal se da por una unión, es posible el desgaste de este elemento por fatiga, de ser necesario intercambiarlo por el repuesto previsto en el paquete de ensamblaje.

El conjunto completo, cuenta con juntas unidas por pernos. Se recomienda la revisión y ajuste periódico de dichos elementos para evitar desalineaciones en el eje o accidentes por efecto de desenganches bruscos de las partes móviles.

4. Indicaciones de Seguridad

- Comprobar que la unión entre el motor brushless y el eje sea lo suficientemente firme para sumergirla y generar el trabajo esperado.
- Verificar que las juntas con pernos tengan el ajuste necesario para evitar desprendimientos en la línea principal de transmisión.
- Al realizar la instalación eléctrica en el montaje del módulo de propulsión, verificar que no se produzcan cortocircuitos o que queden cables expuestos, ya que podrían ocasionar lesiones graves por transmisión de alta tensión.
- Para un almacenaje adecuado, comprobar que los elementos impresos en PLA y segmentos metálicos se encuentren secos para evitar desgaste prematuro por corrosión o descomposición del material.

5. Operación del Producto

Para un correcto funcionamiento es necesario comprobar las secciones anteriores, para evitar lesiones graves por un incorrecto ensamblaje o exposición a altas tensiones.

Al ser un dispositivo modular, es posible adaptarlo para diferentes actividades, como impulso en paddle-boards o mini submarinos de exploración, siguiendo las recomendaciones expuestas en Armado e Indicaciones de seguridad.

Para poner en marcha el dispositivo de propulsión es necesario conectar el motor eléctrico a una fuente de voltaje adecuada que será dada por un speedcontroller de la serie y el receptor de señal que brindará el control adecuado para el correcto funcionamiento del propulsor.

6. Herramientas e Insumos para Ensamblaje y Cuidado Del Dispositivo

- Llave allen No. 3 (mm)
- Llave allen No. 2 (mm)
- Pinza de punta
- Lubricante multiusos

TRABAJO A FUTURO

Este proyecto brinda un punto de partida para el desarrollo de nuevas investigaciones en ramas tanto de Ingeniería Electrónica como de Ingeniería Mecánica, poniendo en consideración los elementos que conforman el prototipo presentado en este trabajo de integración. Entre los posibles campos de estudio se encuentran:

- Estudio de encapsulamiento de elementos electrónicos con bajo costo
- Construcción con materiales compuestos, añadiendo resistencia a los componentes generados mediante manufactura aditiva
- Formas de refrigeración para motores eléctricos encapsulados para trabajar en el agua y aire
- Implementación de dispositivos anfibios configurados con encapsulamiento de resina epóxica
- Implementación de un equipo de pruebas para propulsores de bajo empuje, menor a 8 kilogramos.

CONCLUSIONES

Al finalizar la construcción del prototipo, se realizaron pruebas de funcionamiento para verificar el cumplimiento de objetivos planteados en conjunto con los requerimientos propuestos por el cliente en donde se pudo concluir lo siguiente:

- Es posible lograr un encapsulamiento efectivo de bajo costo para un motor eléctrico de tipo brushless con un valor menor a \$ 20.00 USD, logrando un funcionamiento normal bajo el agua
- Se logra generar control vía radio, añadiendo un módulo de comunicación (receptor) y un speedcontroller al prototipo.
- Se puede conseguir un propulsor funcional con un costo total de \$ 205.00 en materiales generando un ahorro versus la importación de un propulsor con características similares

Tabla 5. Costo de materiales para prototipado

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
2	RESINA + AGLUTINANTE	25	50
2	MOTOR BRUSHLESS	35	70
1	PLA KILO	45	45
1	SPEED CONTROLLER	20	20
1	KIT CONECTORES ELECTRICOS	20	20
		TOTAL	205

Por sí solo el prototipo no puede ejercer un trabajo completo. El modelo requiere ser montado en un dispositivo superior (equipo de pruebas) para generar flotación o que pueda ser equilibrado bajo el agua para generar pruebas de desempeño completas

En conjunto con las características de la boquilla prevista para la salida de agua es muy importante considerar siempre el uso de paredes de direccionamiento del agua, para que después de pasar por las hélices no se pierda energía por rotación.

Después de generar verificaciones físicas en el modelo se obtuvieron las siguientes comparativas:

Tabla 6. Tabla comparativa Propulsor de Seabotix vs. Propulsor construido

SEABOTIX	WATER JET
• \$ 2717.00 USD	• \$ 350.00 USD
• 28.4 N EMPUJE	• 23 N EMPUJE PROMEDIO
• 0.704 KG DE PESO	• 0.71 KG DE PESO
• 17.57 CM DE LONGITUD	• 17 CM DE LONGITUD FIJA
	• 5 O 7 CM DE LONGITUD ADICIONAL
• HÉLICE DE 2 CUCHILLAS	• HÉLICE DE 3 CUCHILLAS

- Dentro del valor final de \$ 350.00 USD está considerado el tiempo de construcción y mano de obra.
- El valor de empuje promedio se obtuvo con el promedio de valores obtenidos en la simulación de SolidWorks
- La longitud adicional que se presenta en la tabla comparativa se requiere al instalar el motor, y varía dependiendo de la aplicación considerando un motor de 1050 kV (5 cm) o 950 kV (7 cm)

Este tipo de proyectos ayudan en la producción de tecnología del país, de tal forma que se genere confianza y por tanto se pueda conseguir solidez en nuevos emprendimientos gracias a inversión en el campo nacional. Es importante promover el desarrollo local, con esto se podrán generar precios más competitivos para participar contra las grandes marcas de los países más desarrollados, que generen una mayor riqueza que ayude al progreso de todo el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

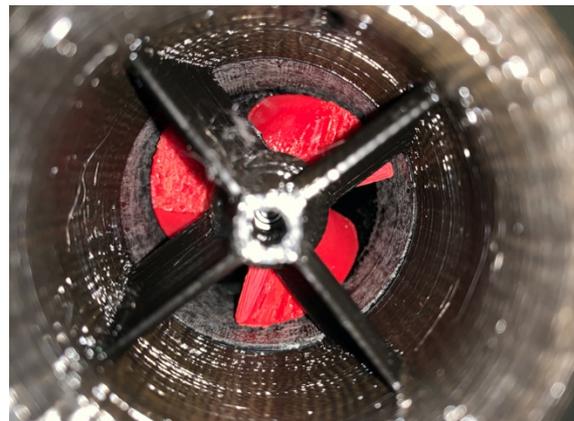
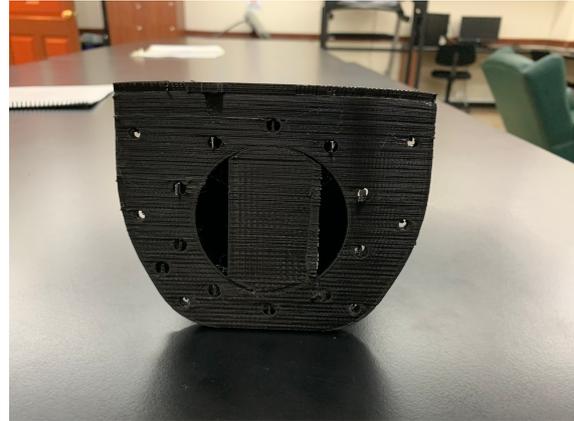
- Bohman, I. (n.d.). *Acero Inoxidable Información general Tipo de corrosión Corrosión uniforme Acero Inoxidable*. 33–37.
- Carlton, J. S., & Carlton, J. S. (2019). Transverse Thrusters. *Marine Propellers and Propulsion*, 379–388. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00014-6>
- Elaplas. (n.d.). *Propiedades físicas cloruro de polivinilo (pvc rigido)*. 600.
- Liu, Z., Lei, Q., & Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood , ceramic , metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Integrative Medicine Research*, 8(5), 3741–3751. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>
- Macreadie, P. I., McLean, D. L., Thomson, P. G., Partridge, J. C., Jones, D. O. B., Gates, A. R., ... Fowler, A. M. (2018). Eyes in the sea: Unlocking the mysteries of the ocean using industrial, remotely operated vehicles (ROVs). *Science of the Total Environment*, 634, 1077–1091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.049>
- Mcharek, M., Hammadi, M., Azib, T., Larouci, C., & Choley, J. Y. (2019). Collaborative design process and product knowledge methodology for mechatronic systems. *Computers in Industry*, 105, 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.008>
- Vallejo Bejarano, P. (2016). *Efecto de las restricciones a las importaciones de productos de acabados para la construcción en el Ecuador y su impacto fiscal 2010-2015*.

ANEXO A: MATERIAL AUDIOVISUAL DEL PROYECTO

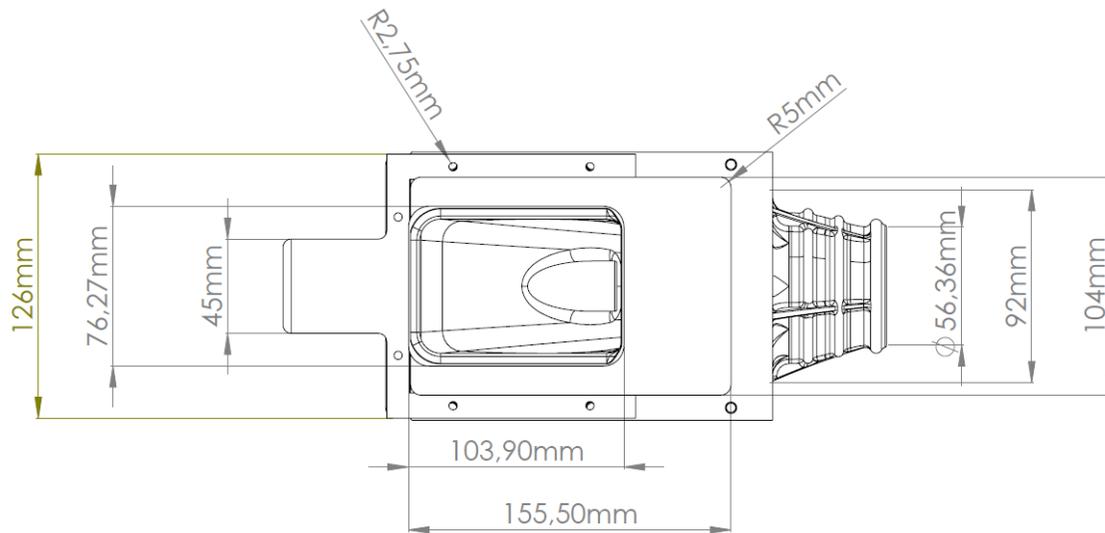
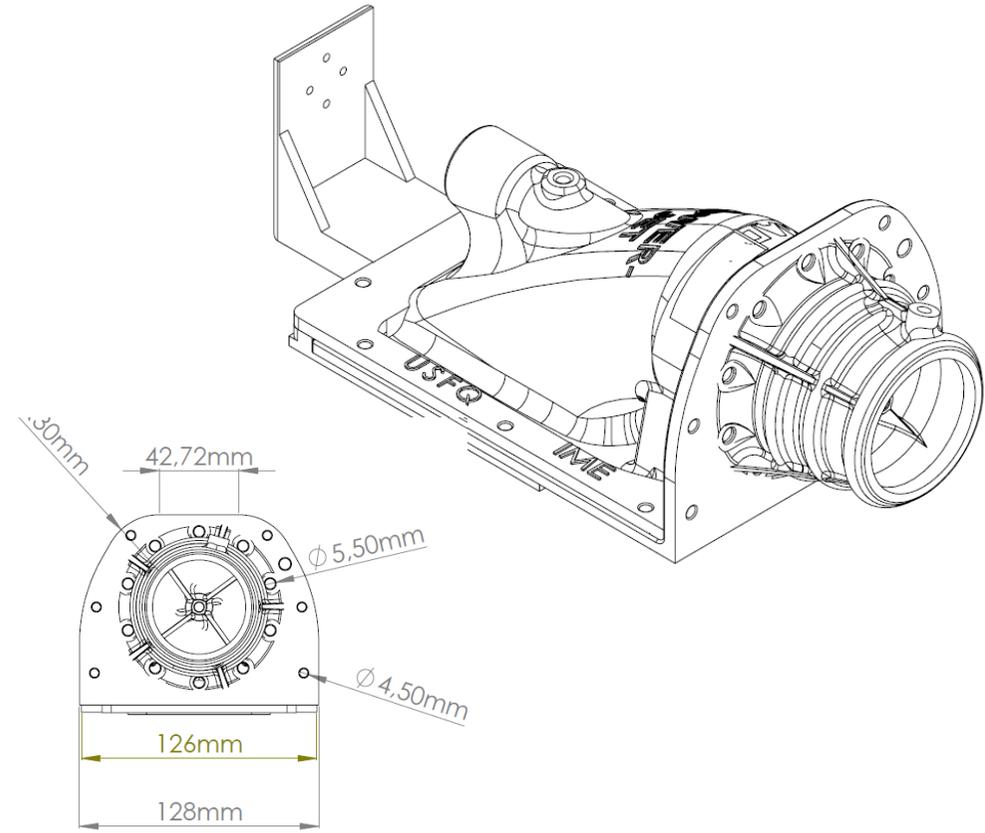
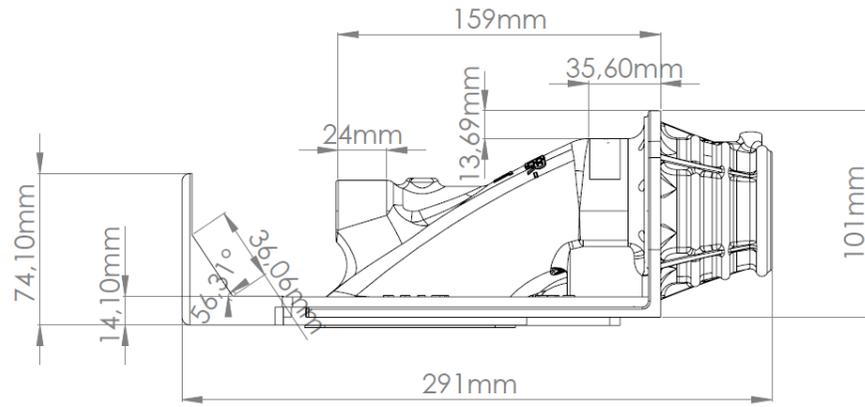
Simulación, perfil de velocidad y funcionamiento en el agua

<https://youtu.be/QSpBBDp35eA>

Fotografías de la generación del prototipo



ANEXO B: PLANO DE CONJUNTO



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO: IMPRESIÓN 3D	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	SANTIAGO ROBAYO	FECHA	TÍTULO: PROPULSOR DE BAJO COSTO	
VERIF.			N.º DE DIBUJO	
APROB.			A2	
FABR.		MATERIAL: PLA		
CAJID.		FEFO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1