

## Diseño y validación de un UUV con sistema de visión computacional integrado Design and validation of a UUV with integrated computer vision system

M. Vázquez-Tzompantzi <sup>a</sup>, T. Salgado-Jiménez <sup>b</sup>, B. Y. Silva-Morales <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Secretaría de Investigación y Posgrado, Instituto Politécnico Nacional, 07360, Ciudad de México, México.

<sup>b</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, 76125, Querétaro, México.

<sup>c</sup> Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional, 07360, Ciudad de México, México.

### Resumen

Este artículo presenta el diseño y validación de un Vehículo Submarino No Tripulado (siglas en inglés, UUV) equipado con un sistema avanzado de visión por computadora basado en algoritmos de procesamiento de imágenes. El objetivo principal es emplear principios mecatrónicos y tecnologías de vanguardia para desarrollar un UUV capaz de capturar imágenes y datos de telemetría, mejorando la exploración submarina en entornos desafiantes. El algoritmo de visión por computadora, basado en OpenCV, permite la detección y el reconocimiento en tiempo real de estructuras y objetos sumergidos. La validación se realiza mediante análisis estáticos y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). Los resultados demuestran la eficacia y versatilidad del UUV en diversas aplicaciones, incluidas inspecciones arqueológicas, operaciones de búsqueda y rescate y la conservación de reservas marinas protegidas.

**Palabras Clave:** Vehículo submarino no tripulado, algoritmos de procesamiento de imágenes, visión por computadora, exploración submarina, simulaciones CFD.

### Abstract

This article presents the design and validation of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) equipped with an advanced computer vision system based on image processing algorithms. The main objective is to employ mechatronics principles and cutting-edge technologies to develop a UUV capable of capturing images and telemetry data, enhancing underwater exploration in challenging environments. The computer vision algorithm, based on OpenCV, enables real-time detection and recognition of submerged structures and objects. Validation is performed through static analyses and computational fluid dynamics (CFD) simulations. The results demonstrate the effectiveness and versatility of the UUV in various applications, including archaeological inspections, search and rescue operations, and the conservation of protected marine reserves.

**Keywords:** Unmanned Underwater Vehicle, Image Processing Algorithms, Computer Vision, Underwater Exploration, CFD Simulations.

### 1. Introducción

La exploración subacuática de cuerpos de agua naturales, como lagos, ríos, mares, cenotes y cuevas submarinas, así como de cuerpos de agua artificiales, como presas, vasos reguladores y tanques de distribución, presenta desafíos únicos que demandan soluciones tecnológicas avanzadas. La inspección de estructuras sumergidas a menudo requiere recursos especializados y conlleva riesgos para los buzos humanos debido a factores como la presión hidrostática, la falta de oxígeno, las temperaturas extremas y los encuentros con sustancias y vida silvestre peligrosas.

Para abordar estos desafíos y mejorar las capacidades de exploración subacuática, este trabajo propone el diseño y validación de un Vehículo Subacuático No Tripulado (También llamado *UUV por sus siglas en inglés*) desarrollado bajo la aplicación de principios mecatrónicos.

El *UUV* tiene como objetivo principal sumergirse y navegar de forma omnidireccional, capturar imágenes de su entorno y mostrar datos de telemetría al operador para obtener una comprensión más precisa del ambiente donde se encuentre, que pueden ser sitios de interés arqueológicos sumergidos, áreas de extracción de minerales, operaciones de búsqueda y rescate, y la preservación de reservas marinas protegidas.

\*Autor para la correspondencia: bsilvam1200@alumno.ipn.mx

**Correo electrónico:** mvazquez@ipn.mx (Marisol Vázquez-Tzompantzi), tsalgado@cidesi.edu.mx (Tomás Salgado-Jiménez), bsilvam1200@alumno.ipn.mx (Bruno Yael Silva-Morales).

Un aspecto significativo de este trabajo implica la implementación de un algoritmo de visión computacional basado en *OpenCV*. Este sistema de visión por computadora permite el procesamiento de imágenes para identificar elementos estructurales y objetos sumergidos con mayor precisión, esto se realiza empleando suavizadores y detección de bordes a las imágenes para la identificación de contornos, dando la capacidad al operador del *UUV* de realizar inspecciones visuales exhaustivas y sin adentrarse al agua.

El artículo presenta los detalles de la metodología de diseño, la arquitectura física del *UUV* y el rendimiento del algoritmo de visión computacional. El proceso de validación incluye análisis estáticos y simulaciones *CFD* para garantizar la integridad estructural y la eficiencia hidrodinámica del *UUV*.

## 2. Objetivos

### 2.1. Diseño

La construcción del robot subacuático propuesto inicia con la selección de componentes mecánicos, electrónicos y electromecánicos estandarizados. Luego, se procede al diseño asistido por computadora de todos los elementos seleccionados para el vehículo y sus accesorios de implementación. Seguidamente, se realiza el ensamblaje de los componentes utilizando un software *CAD* (siglas en inglés de Diseño Asistido por Computadora), asegurando una precisión en el ajuste.

Finalmente, se diseña la estrategia de control electrónico del *ROV* (siglas en inglés de Vehículo Remotamente Operado) desde la Interfaz Hombre-Máquina (conocida también *HMI* por sus siglas en inglés) para garantizar una respuesta precisa a las instrucciones emitidas desde la superficie.

### 2.2. Validación mediante software CAE

La evaluación del desempeño del robot bajo el agua implica varios pasos. En primer lugar, se realiza una validación mediante Dinámica Computacional de Fluidos (*CFD* por sus siglas en inglés) para analizar su comportamiento dinámico en el medio acuático. Consecuentemente, partiendo de los resultados del *CFD* se efectúa una validación mediante análisis estáticos para determinar la resistencia requerida en los elementos estructurales. Estos procedimientos garantizan una exhaustiva evaluación del desempeño del robot en un entorno subacuático.

### 2.3. Implementación

El proceso de implementación del robot se divide en varias etapas. Entre ellas, la construcción de los componentes de hardware necesarios, incluyendo placas de circuitos electrónicos y piezas mecánicas para la sujeción de componentes. Luego, se lleva a cabo la integración de los diversos componentes adquiridos y desarrollados en el casco del robot, montando actuadores, sensores, estructuras, electrónica y otros elementos.

## 3. Definición del problema

La cuidadosa observación de cuerpos de agua naturales como lagos, ríos, mares, cenotes, cuevas submarinas, así como de

cuerpos de agua artificiales como presas, vasos reguladores y tanques de distribución, permite detectar vicisitudes al inspeccionar estructuras subacuáticas como tanques de agua, muelles, plataformas petroleras marinas, tuberías submarinas, elementos de concreto e instalaciones eléctricas o de telecomunicaciones marinas, entre otras. Algunas de estas dificultades incluyen:

- La necesidad de adentrarse en el cuerpo de agua para realizar la inspección.
- Riesgos para la integridad física y psicológica al enfrentarse a: la presión hidrostática, falta de oxígeno, temperaturas bajas o elevadas dentro del agua, contaminantes químicos en los cuerpos de agua, derrumbes dentro de cuevas subacuáticas, encuentros con animales como caimanes, medusas, etc., explosiones en instalaciones de gas submarinas, descargas eléctricas en dichas instalaciones, accidentes debido al manejo incorrecto del Equipo de Protección Personal (*EPP*).
- Escasa visibilidad debido a la turbidez del agua.
- Perturbación de los ecosistemas subacuáticos causada por la presencia humana durante las inspecciones.

Considerando las circunstancias expuestas por los autores Griffiths, (2003) y Hawkins (2019) en sus trabajos, es evidente que la exploración de entornos submarinos está limitada debido a las condiciones desfavorables e inhóspitas mencionadas por el autor Johannessen et al. (1994). Sin embargo, existen diversas actividades que son necesarias de realizar en estos entornos, y las más relevantes han sido seleccionadas para destacar en este contexto.

## 4. Metodología

Con base en la información de Griffiths et al. (1999) se optó por utilizar la metodología propuesta por los autores Yan y Zante (2010), ver Figura 1, demostrando el enfoque mecatrónico empleado.

### A. Necesidades y Requerimientos

El diseño y desarrollo del robot submarino se basa en una cuidadosa consideración de las necesidades (N) y requerimientos (R) fundamentales que se han establecido.

En primer lugar, el robot debe ser capaz de realizar inmersiones y navegar de manera omnidireccional en el agua, cumpliendo así con la necesidad (N1). Además, debe operar en un volumen de agua no menor a 5000 litros (N2), con rangos de temperatura entre 10° y 20° Celsius (N3) para garantizar su funcionamiento óptimo y la estabilidad en el agua (N4).

El cumplimiento de los requerimientos es igualmente esencial. El robot debe capturar imágenes de su entorno y enviarlas al operador (R1), asegurando una operación remota con un alcance mínimo de diez metros (R2). Su capacidad de desplazamiento omnidireccional (R3) es crucial para obtener imágenes de las cisternas a explorar, y su estructura debe resistir la presión del agua dulce a una profundidad máxima de 5 metros (R4). Además, se requiere un sistema de iluminación

(R5) para compensar la ausencia de luz natural en el entorno subacuático, asegurando una exploración efectiva.

En conjunto, estos requisitos y necesidades orientan el diseño y la construcción del robot submarino para cumplir su función de inspección de cisternas de agua.

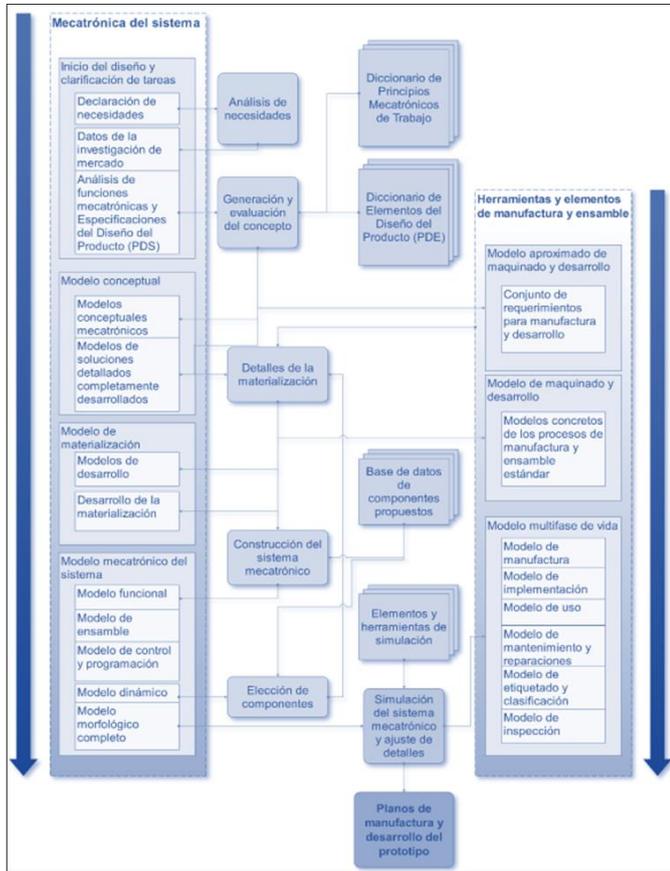


Figura 1: Metodología empleada Yan y Zante (2010).

**B. Especificaciones de Diseño de Producto (PDS)**

En la Tabla 1, se desglosan las especificaciones del diseño de producto:

Tabla 1: PDS

<b>Especificaciones de Diseño de Producto</b>	
Especificaciones de Rendimiento	<p>Funciones: lectura de señales, adquisición de imágenes, medición de parámetros, control de motores de posición y desplazamiento, control de iluminación, desplegar información en una pantalla.</p> <p>Apariencia: la apariencia puede ser similar a la de los UUV's expuestos en el estado del arte.</p> <p>Ergonomía: debe tener manijas de un tamaño tal que el operador final pueda sujetarlo de manera firme y simple con sus manos.</p> <p>Calidad: Para cuidar la calidad se deben emplear piezas estándar en el ámbito de la robótica submarina.</p>

<b>Especificaciones de Diseño de Producto</b>	
	<p>Dimensiones: Debe tener como dimensiones máximas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.60 m de largo.</li> <li>• 0.50 m de ancho.</li> <li>• 0.40 m de alto</li> </ul> <p>Peso: considerando el volumen establecido en las dimensiones, se considera que un peso máximo apropiado puede ser aproximadamente 12 kg.</p> <p>Alcance de profundidad 5m.</p>
Requerimientos de Manufactura	<p>Procesos de Manufactura: considerando las recomendaciones del autor Griffiths et al. (1999), se debe mantener simple la producción. Partiendo del árbol de objetivos propuesto, se contempla que la mayoría de las piezas sean comerciales (como el desarrollado por Schill et al. (2018)) por los estándares que ya cumplen, restringiendo que los aditamentos a desarrollar no requieran procesos más allá de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso de deposición de plástico (Impresión 3D).</li> <li>• Mecanizado por arranque de viruta (Torno o Fresadora).</li> </ul> <p>Para los componentes electrónicos se pretende manufacturar con un especialista la tarjeta electrónica para que también cumpla con los estándares necesarios.</p> <p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ABS: de acuerdo con las características mecánicas y propiedades físicas de la impresión 3D con ABS expuestas por Khatwani y Srivastava (2019), se considera que este material es apropiado para imprimir las piezas complementarias del robot.</li> <li>• AISI 6061/6063: considerando la maleabilidad del aluminio, su capacidad de conducción térmica y su baja densidad con respecto a otros metales, de acuerdo con Hibeler (2017).</li> </ul> <p>Ensamblado: contemplando los beneficios de la impresión 3D con ABS expuestos por Khatwani y Srivastava (2019), los ensamblados deben ser en su mayoría a presión para evitar en lo mayor posible el uso de tornillería. En los casos que se requiera tornillería se recurrirá al uso de tornillos de acero inoxidable milimétricos.</p>
Condiciones de Operación	<p>Navegación: el desplazamiento debe ser omnidireccional y el robot debe de resistir una profundidad de cero a cinco metros.</p> <p>Parámetros físicos del agua: se requiere que el agua se encuentre en una temperatura entre 10° Celsius - 40° Celsius.</p> <p>Agua con Salinidad de <math>1028 \frac{kg}{m^3}</math></p> <p>Las condiciones de humedad del robot deben oscilar entre 15 - 100%</p>
Estandares de Aceptación	<p>El principal estándar de aceptación es que no existan filtraciones de agua a la cámara que resguarde los componentes electrónicos.</p> <p>Sellado hermético en las conexiones externas al casco del robot.</p>

<i>Especificaciones de Diseño de Producto</i>	
	Conexiones eléctricas a tabillas o bornes estandarizados.
Disposiciones Legales	Las disposiciones legales para el uso de los UUV/AUV's, se muestran en la publicación: <i>The Legal Regime Governing The Operation of AUV</i> , del autor Brown (2003).

*C. Diseño conceptual*

Partiendo de lo expuesto por Moore et al. (2010) para el movimiento omnidireccional se elige un posicionamiento estratégico para los propulsores del robot, ver Figura 2.

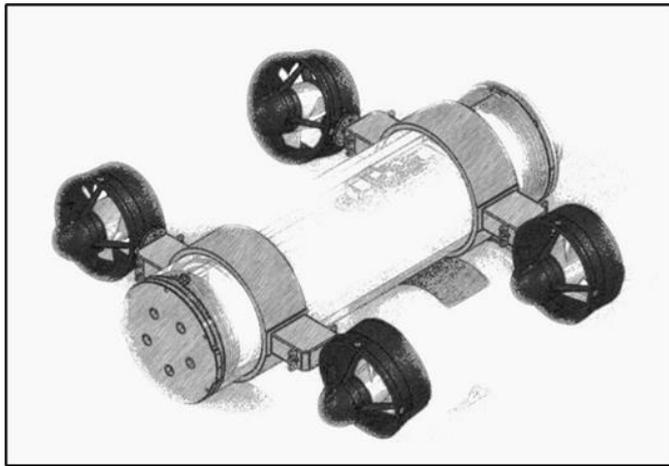


Figura 2: Diseño Concepto del UUV.

Se realizó este diseño conceptual basado en componentes estandarizados, y otros diseñados exclusivamente para este trabajo de investigación para continuar la metodología.

*D. Diseño de Arquitectura Física*

La arquitectura física del UUV se compone de una estructura robusta y hermética que aloja todos los componentes esenciales para su funcionamiento. En la parte frontal, se encuentra un sistema de cámara de alta resolución que permite la captura de imágenes y videos en tiempo real. En los laterales, se sitúa un conjunto de propulsores, que impulsan al UUV a través del agua y le brinda la capacidad de moverse en diferentes direcciones.

Además, el UUV está diseñado con sensores y actuadores, que proporcionan información sobre su orientación y permiten realizar ajustes en su trayectoria. La arquitectura también incluye una unidad de control y comunicación que permite la interacción con el operador y facilita la transmisión de datos y comandos. Se presenta un esquema de esta arquitectura, ver Figura 3.

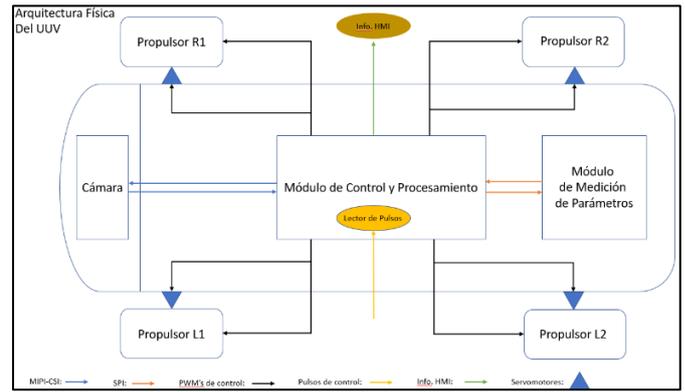


Figura 3: Arquitectura del UUV.

*E. Validación computacional*

De acuerdo con el autor Brutzman (1992), el análisis CFD en la robótica submarina tiene diversas aplicaciones prácticas. Por un lado, se puede utilizar para optimizar el diseño del robot, mejorando su eficiencia hidrodinámica y reduciendo la resistencia al movimiento. También permite predecir la estabilidad y maniobrabilidad del robot en diferentes condiciones, lo que es esencial para su operación.

▪ Estudio CFD del Propulsor

En este estudio se realizó una simulación del comportamiento del propulsor generando un flujo de  $0.5 \frac{m}{s^2}$  para observar el comportamiento del fluido (especificado en las condiciones de operación), el flujo del fluido, ver Figura 4.

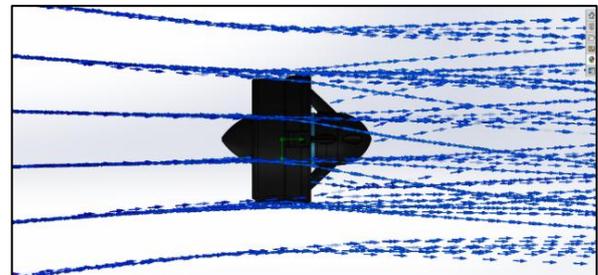


Figura 4: Estudio CFD del propulsor.

Consecuentemente se realizó en el software la simulación del robot completo y su comportamiento en el fluido con una velocidad de  $0.5 \frac{m}{s^2}$  y profundidad establecida en la tabla de PDS, con la finalidad de estimar el comportamiento del robot desplazándose hacia adelante con las mismas condiciones de operación, ver Figura 5.

Este análisis muestra gráficamente que no se generan vórtices que puedan causar inestabilidad en el robot al desplazarse, además se muestra la velocidad máxima y mínima alcanzada por el fluido que se desplaza alrededor del robot en movimiento.

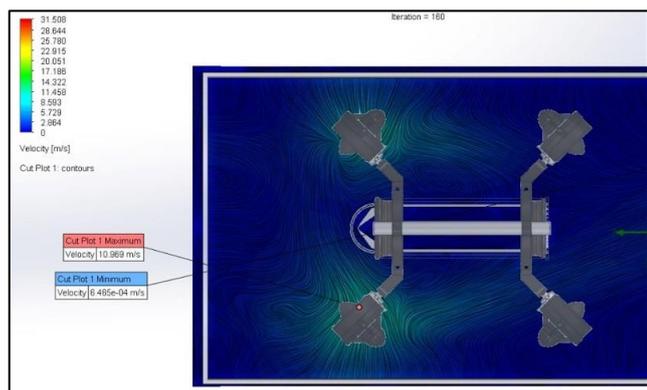


Figura 5: Estudio CFD del UUV, vorticidad.

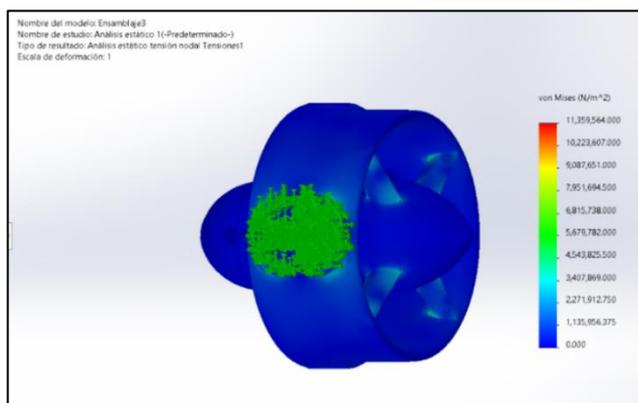


Figura 7: Estudio estático del propulsor.

En la Figura 6, se observa en diferentes colores la pérdida de velocidad en el fluido cuando el robot se desplaza a través de él, siendo el rojo fluido con velocidad cero y azul la velocidad máxima establecida.

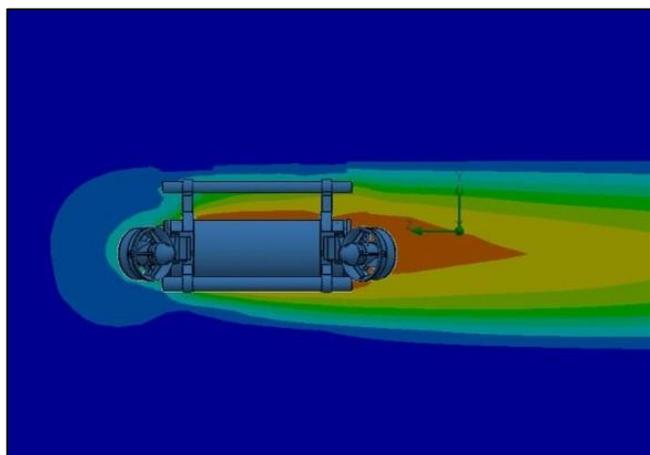


Figura 6: Estudio CFD del UUV, velocidad.

- Análisis estático de fuerza ejercida en el apoyo del propulsor

Concluido el análisis *CFD*, se han exportado los resultados a un estudio estático para conocer el esfuerzo los desplazamientos que sufrirá el propulsor.

Para el análisis estático además del ajuste de parámetros extraídos del *CFD* se han excluido de los análisis sólidos irrelevantes, se ha mallado con base a curvatura y se ha fijado el propulsor, además se ha seleccionado ABS-PC como material principal del ensamble, esto indicado por el fabricante.

En la gráfica de von Mises se muestra la distribución de tensiones equivalentes en un material. Los colores representan niveles de tensión, donde el rojo indica altas tensiones y el azul indica bajas tensiones. La gráfica permite visualizar las zonas de mayor concentración de tensiones, lo que es importante para evaluar la resistencia y el comportamiento estructural del propulsor, ver la Figura 7.

Partiendo de las diferentes simulaciones y sus resultados se fue mejorando el diseño hasta llegar a una versión final y con ella proceder al diseño de detalle como dice la metodología elegida.

#### F. Diseño de detalle

En el estudio del comportamiento dinámico del propulsor de un *ROV* se empleó la herramienta de *CFD* del software SolidWorks. Esta herramienta permitió simular y analizar cómo interactúa el fluido circundante con el propulsor del *ROV* durante su funcionamiento. A través de estas simulaciones, se pudo obtener información sobre las fuerzas generadas por el propulsor en diferentes condiciones de operación, como la velocidad y el ángulo de inclinación. Posteriormente, se realizó un estudio estático basado en los resultados dinámicos obtenidos, lo que permitió evaluar las fuerzas estáticas ejercidas por el propulsor en diferentes posiciones y configuraciones. Esto proporcionó un análisis detallado de las fuerzas generadas por el propulsor del *ROV*, lo que es fundamental para comprender su rendimiento y optimizar su diseño y funcionamiento en aplicaciones submarinas.

Partiendo de los resultados de estos estudios se realizó el diseño final del robot, ver Figura 8.

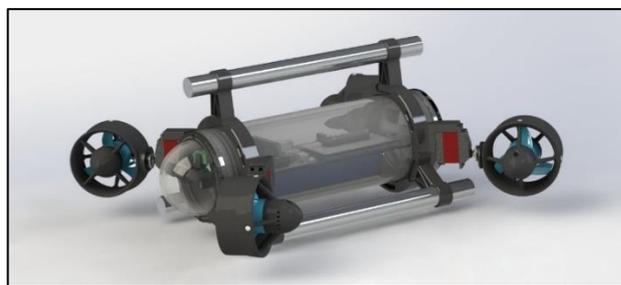


Figura 8: Diseño final del robot.

Con este diseño final establecido y la retroalimentación de la metodología fue como se fueron seleccionando los materiales de construcción para los elementos que no eran comerciales. Consecuente a esto se comenzó la construcción física del prototipo.

## 5. Visión computacional

Establecido el diseño final del robot se postuló un algoritmo para detectar con él objetos subacuáticos.

El sistema de visión computacional propuesto para el *UUV* se basa en el algoritmo desarrollado utilizando la biblioteca *OpenCV*. El proceso de procesamiento de imágenes se realiza en tiempo real para capturar y analizar la información visual del entorno subacuático. A continuación, se describen los pasos principales del algoritmo desglosado, ver Figura 9.



Figura 9: Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

### A. Algoritmo de visión computacional implementado

En la Figura 10 se presenta una imagen capturada por la cámara del robot en un entorno subacuático con agua dulce a 18° Celsius, junto con los filtros procesados con el algoritmo propuesto. Estos filtros incluyen el suavizado gaussiano para reducir el ruido, el procesamiento de la imagen en escala de grises, y la detección de bordes mediante el efecto *Canny*. Asimismo, se muestran los contornos detectados en la imagen, lo que permite visualizar la identificación y delimitación de objetos o estructuras presentes en el entorno acuático. El algoritmo implementado demuestra eficiencia al reconocer los contornos de los objetos sumergidos, esto da pauta para mejorar la calidad y el procesamiento de las imágenes capturadas, lo que resulta de vital importancia en el proceso de exploración e inspección subacuática.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación han dado la pauta para la construcción física del robot, adquiriendo componentes comerciales por los estándares que ya cumplen dentro de la rama de la robótica submarina, además se ha comenzado la construcción y maquinado de las piezas diseñadas específicamente para este proyecto de investigación.

Los estudios *CFD* dan pauta para la obtención de las gráficas de Von Mises en los estudios estáticos, estos últimos permiten entender de forma cuantitativa las deformaciones y desplazamientos resultantes (aproximados) en los elementos que se están construyendo para el robot físico.

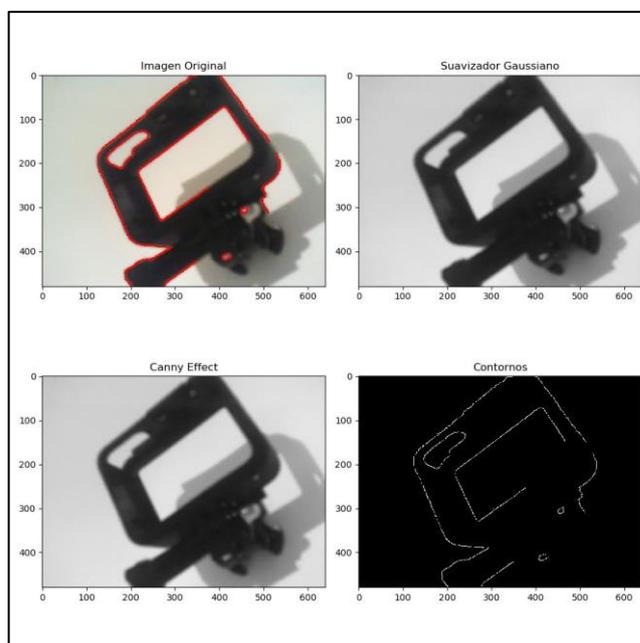


Figura 10: Imagen adquirida y procesada por el algoritmo implementado.

Al proporcionar información adicional como los parámetros de operación del robot se obtiene una mejor aproximación en los resultados sobre la interacción entre el fluido circundante y los objetos o estructuras que conforman el robot. El *CFD* además permite simular y analizar cómo se desplaza el fluido alrededor del cuerpo del *UUV*, cómo se generan las fuerzas y cómo se distribuyen las presiones. Esta información es crucial para comprender y estimar su comportamiento dinámico dentro de los entornos subacuáticos, como la resistencia hidrodinámica, la generación de turbulencias y las fuerzas de arrastre.

El sistema de visión computacional implementado en el *UUV* es un algoritmo eficiente que puede utilizarse para la inspección de entornos subacuáticos. El algoritmo se basa en una serie de pasos bien definidos que permiten la detección y visualización de contornos en imágenes subacuáticas.

Los resultados de este trabajo muestran una de las diversas aplicaciones y potencial de la robótica submarina auxiliada de visión computacional. La integración de tecnologías avanzadas permite una exploración subacuática más segura, eficiente e informativa, abriendo el camino para una amplia gama de aplicaciones en diversos entornos acuáticos.

### Agradecimientos

Gracias al M. en C. Miguel Ángel Rodríguez Fuentes de la Unidad Profesional Interdisciplinaria En Ingeniería y Tecnologías Avanzadas por su asesoramiento y colaboración en este trabajo de Tesis.

Gracias a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN y al CIDESI Qro, por el apoyo para la realización de este trabajo de Investigación

## Referencias

- Brown, E. (2003). The legal regime governing the operation of AUVs. En G. Griffiths (Ed.), *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles* (pp. 295–313). London: Taylor & Francis Group.
- Brutzman, D.P., Kanayama, Y. y Zyda, M. J. (1992). Integrated simulation for rapid development of autonomous underwater vehicles. En: *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology* Washington, D.C.: IEEE.
- Griffiths, G., Stevenson, P., Webb, A.T., Millard, N.W., Mcphail, S.D., Pebody, M. y Perrett, J.R. (1999). Open ocean operational experience with the Autosub-1 autonomous underwater vehicle. En *Proceedings 11th Unmanned Untethered Submersible Technology Symposium* (pp. 1–12). Durham, New Hampshire.
- Griffiths, G. (2003). *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. London: Taylor & Francis Group.
- Hawkins, S. J., Allcock, A. L., Bates, A. E., Firth, L. B., Smith, I. P., Swearer, S. E. y Todd P. A. (eds) (2019). *Oceanography and Marine Biology: An annual review. Volume 57*. CRC Press.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mecánica de materiales*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- Johannessen, O. M., Muench, R. D. y Overland, J. E. (1994). The polar oceans and their role in shaping the global environment. *Geophysical Monographs* 85. American Geophysical Union.
- Khatwani, J. y Srivastava, V. (2019). Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Solidified PLA Parts Fabricated by 3D Printing Process. In: Kumar, L., Pandey, P., Wimpenny, D. (eds) *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Springer, Singapore.
- Moore, S. W., Bohm, H. y Jensen, V. (2010). *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*. Monterey, CA: Advanced Technology Education (MATE) Center.
- Schill, F., Bahr, A. y Martinolli, A. (2018). Vertex: A new distributed underwater robotic platform for Distributed Autonomous Robotic Systems. Suiza: Springer.
- Yan, XT. y Zante, R. (2010). A Mechatronic Design Process and Its Application. In: Bradley, D., Russell, D. (eds) *Mechatronics in Action*. Springer, London.