

# Diseño y Validación de un UUV con Sistema de Visión Computacional

Marisol Vázquez Tzompantzi  
Secretaria de Investigación y  
Posgrado,  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
[mvazquez@ipn.mx](mailto:mvazquez@ipn.mx)

Tomás Salgado Jiménez  
Robotica Submarina  
Centro de Ingeniería y  
Desarrollo Industrial  
Queretaro, México  
[tsalgado@cidesi.edu.mx](mailto:tsalgado@cidesi.edu.mx)

Bruno Yael Silva Morales  
UPIITA,  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
[bsilvam1200@alumno.ipn.mx](mailto:bsilvam1200@alumno.ipn.mx)

**Abstract—** *In the context of this study, an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) equipped with an advanced computer vision system based on image processing algorithms has been developed. The validation of the UUV encompassed a series of tests, including static analyses and computational fluid dynamics (CFD) simulations, which allowed for a quantitative understanding of the approximate deformations and displacements in the UUV components, proving to be crucial in ensuring its performance in underwater environments.*

*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 and applications such as archaeological inspections, search and rescue operations, and the conservation of protected marine reserves.*

**Keywords—** *Unmanned Underwater Vehicle (UUV), Validation, Computer Vision, Image processing algorithms, CFD Simulations, Underwater environments.*

## I. 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.

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*.

## II. OBJETIVOS

### A. 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.

### B. 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.

### C. Implementación/Construcción

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.

**D. Pruebas de funcionamiento**

El paso consecutivo a la construcción del robot es la etapa de pruebas que pretende realizarse en un entorno controlado, las características de este entorno se definen en las especificaciones de diseño.

**III. 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 dificultades 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:

- a) La necesidad de adentrarse en el cuerpo de agua para realizar la inspección.
- b) Riesgos para la integridad física y psicológica al enfrentarse a:
  - Presión hidrostática.
  - Falta de oxígeno.
  - Drásticas temperaturas 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).
- c) Escasa visibilidad debido a la turbidez del agua.
- d) Perturbación de los ecosistemas subacuáticos causada por la presencia humana durante las inspecciones.

Considerando las circunstancias expuestas por los autores Griffiths [1] y Hawkins [2] 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 [3]. 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.

**IV. METODOLOGÍA**

Con base en la información de Griffiths [4] se optó por utilizar la metodología propuesta por los autores X. Yan y R.

Zante [5], se ilustra en la “Fig 1”, demostrando el enfoque mecatrónico empleado.

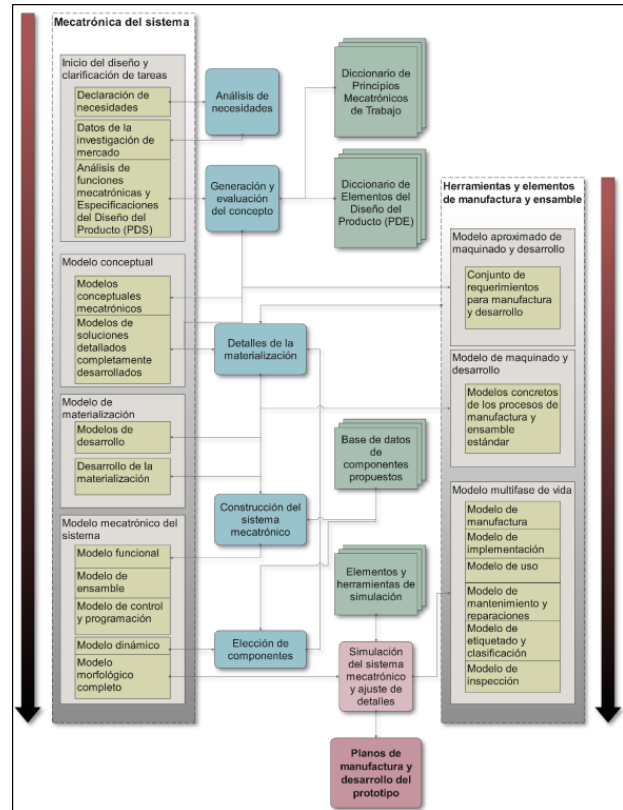


Fig. 1: Metodología mecatrónica empleada.

**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.

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

TABLE I. PDS

<i>Especificaciones de Diseño de Producto</i>	
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 <i>UUV</i>'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> <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 [4], 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 Bahr [6]) 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 [7], 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</li> </ul>

<i>Especificaciones de Diseño de Producto</i>	
	<p>a otros metales, de acuerdo con Hibeler [8].</p> <p>Ensamblado: contemplando los beneficios de la impresión 3D con PLA expuestos por Srivasta [7], los ensambles 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{km}{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> <p>Conexiones eléctricas a tablillas o bornes estandarizados.</p>
Disposiciones Legales	<p>Las disposiciones legales para el uso de los <i>UUV/AUV</i>'s, se muestran en la publicación: The Legal Regime Governing The Operation of <i>AUV</i>, del autor Brown [9].</p>

**C. Diseño Conceptual**

Partiendo de lo expuesto por Moore [10] para el movimiento omnidireccional se elige un posicionamiento estratégico para los propulsores del robot como el mostrado en la “Fig 2”.

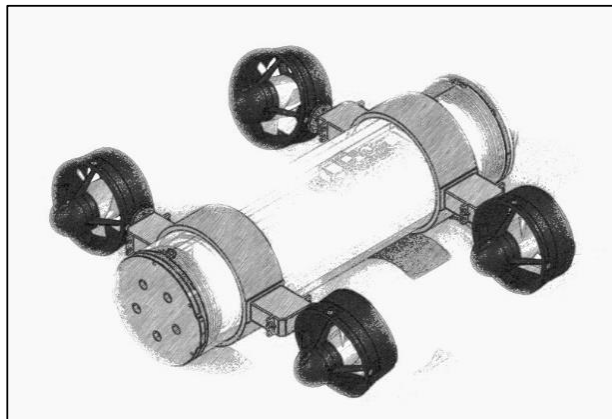


Fig. 2: Diseño Concepto del UUV.

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 la arquitectutra física en “Fig. 3”.

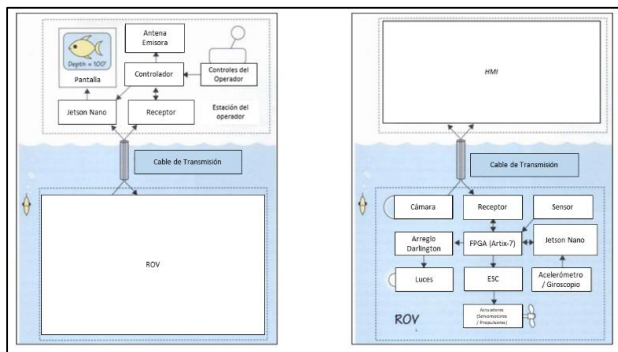


Fig. 3: Arquitectura física

**E. Validación Computacional**

De acuerdo con el autor Brutzman [11], 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 es mostrado en “Fig. 4”.

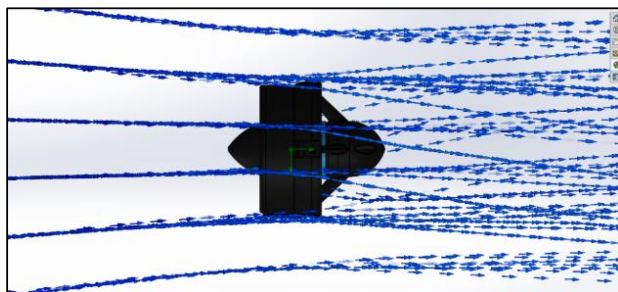


Fig. 4: Estudio CFD del propulsor.

Se puede observar el aumento del flujo del fluido a la salida del propulsor, el sentido del flujo es indicado por las flechas del simulador que a su vez representan el flujo.

- Estudio CFD del UUV

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. Este estudio CFD se puede observar en la “Fig. 5”.

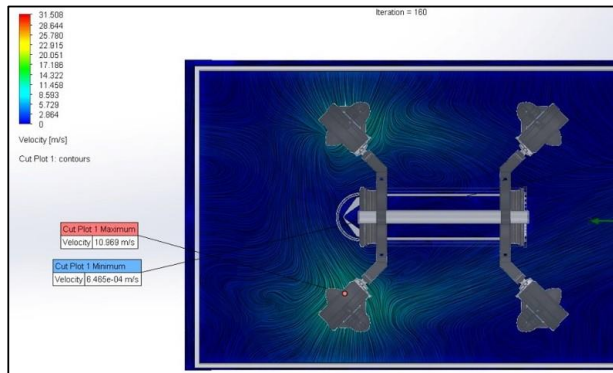


Fig. 5: Estudio CFD del UUV, vorticidad.

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.

En la “Fig. 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.

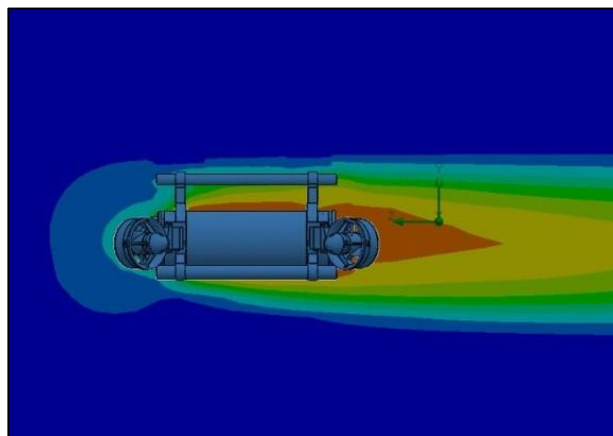


Fig. 6: Estudio CFD del UUV, velocidad.

- *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 solidos 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, lo anterior es ilustrado en la “Fig. 7”.

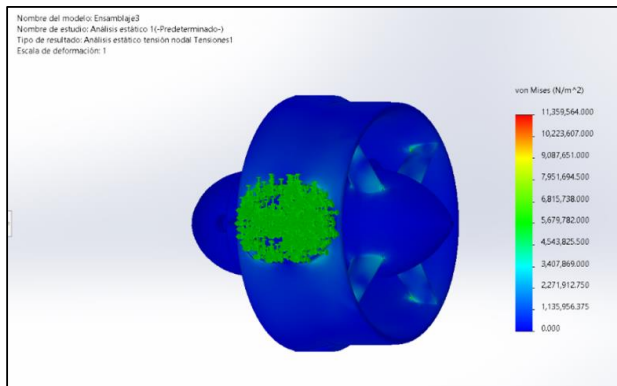


Fig. 7: Estudio Estático del Propulsor.

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 mostrado en la “Fig. 8”.

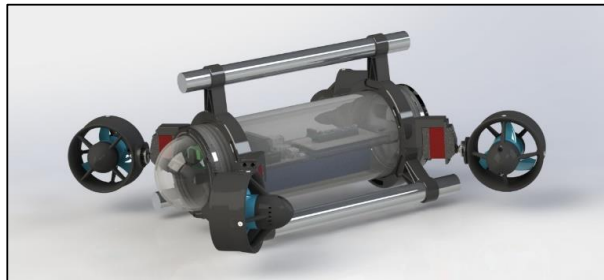


Fig. 8: Diseño final del robot.

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.

V. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Una vez obtenidos los materiales seleccionados se fabrican las piezas para la integración de toso los sistemas y subsistemas, dando como resultado el prototipo de la “Fig. 9”.



Fig. 9: Prototipo.

VI. VISIÓN COMPUTACIONAL

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

Para la captura de imágenes con el robot se propone el uso de luz infrarroja para las condiciones de oscuridad a las que se pueda enfrentar, adicional a esto se iluminó el entorno con luz fría *LED* (*de las siglas en inglés de Diodo Emisor de Luz*) de 3320K.

En la “Fig. 10” se expone una imagen que muestra el Sistema de iluminación infrarrojo del robot.



Fig. 10: Sistema de luz infrarrojo del robot.

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 en la “Fig. 11”.

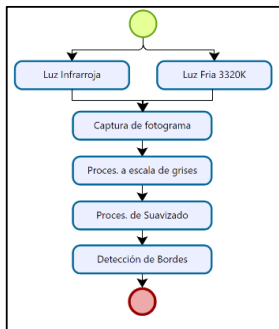


Fig. 11: Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

**A. Algoritmo De Visión Computacional Implementado Auxiliado por Luz Infrarroja**

En la "Fig. 12". se presenta una imagen capturada por la cámara del robot en un entorno subacuático con agua dulce a 18° Celsius, con iluminación infrarroja, junto con los filtros procesados con el algoritmo propuesto.

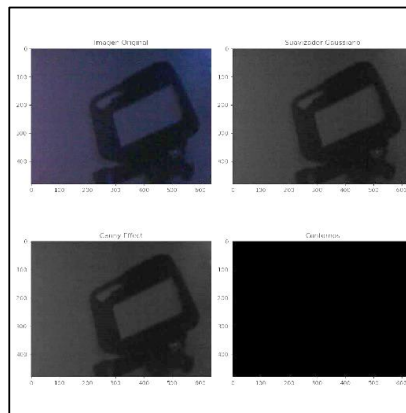


Fig. 12: Imagen capturada con luz infrarroja y procesada por el algoritmo implementado.

**B. Algoritmo De Visión Computacional Implementado Auxiliado por Luz fría**

En la "Fig. 13". se presenta una imagen capturada por la cámara del robot en un entorno subacuático con agua dulce a 18° Celsius, con iluminación *LED* de luz fría, junto con los filtros procesados con el algoritmo propuesto.

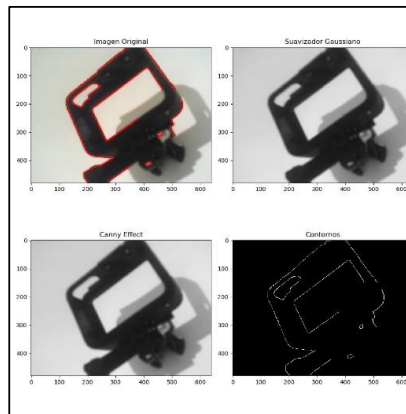


Fig. 13: Imagen capturada con luz fría 3320K y procesada por el algoritmo implementado.

Los filtros en ambas figuras 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.

## CONCLUSIONES

Los estudios *CFD* proporcionan las bases para la obtención de gráficos de Von Mises en análisis estáticos. Estos análisis estáticos permiten una comprensión cuantitativa de las deformaciones y desplazamientos aproximados en los componentes que se fabricaron para el robot físico.

Al proporcionar información adicional, como los parámetros de operación del robot, se logra una aproximación más precisa en los resultados relativos a la interacción entre el fluido circundante y los objetos o estructuras que componen el robot. El *CFD* además permite simular y analizar cómo se desplaza el fluido alrededor del cuerpo del *UUV*, así como la generación de fuerzas y la distribución de presiones. Esta información desempeña un papel fundamental en la comprensión y estimación del comportamiento dinámico del robot en entornos subacuáticos, abordando aspectos como la resistencia hidrodinámica, la generación de turbulencias y las fuerzas de arrastre.

Se ha obtenido un prototipo funcional con la capacidad de desplazarse en un entorno con las especificaciones expuestas en la tabla de *PDS*.

Las imágenes obtenidas por el sistema de iluminación de luz infrarroja muestran que es insuficiente la luz arrojada por el sistema debido a que no se aprecia ningún contorno detectado por el sistema de procesamiento.

Con la imagen obtenida con la luz fría (*LED* blanco) el sistema de visión computacional implementado en el *UUV* muestra ser un algoritmo eficiente que puede utilizarse para la inspección de entornos subacuáticos. El procesamiento se basa en una serie de pasos bien definidos que permiten la detección y visualización de contornos en imágenes subacuáticas.

Los resultados de este estudio demuestran una de las múltiples aplicaciones y el potencial de la robótica submarina respaldada por sistemas de visión computacional. La integración de tecnologías avanzadas facilita una exploración subacuática más segura, eficiente y enriquecedora, allanando el camino para una amplia variedad de aplicaciones en diversos entornos acuáticos.

## REFERENCIAS

- [1] G. Griffiths, *Technology And Applications Of Autonomous Underwater Vehicles*, London: Taylor & Francis Group, 2003.
- [2] J. Hawkins y A. Allcock, *Oceanography and Marine Biology*, CRC Press, 2019.
- [3] O. Johannessen y R. Muench, *The polar oceans and their role in shaping the global environment*, Geophysical Monographs 85, American Geophysical Union, 1994.
- [4] G. Griffiths y Stevenson, «Open ocean operational experience with the Autosub-1 autonomous underwater vehicle,» de *Proceedings 11th Unmanned Untethered Submersible Technology Symposium*, Durham, New Hampshire, 1999, pp. 1-12.
- [5] X. Yan y R. Zante, *A Mechatronic Design Process and Its Applications. Case Studies in Mechatronics - Applications and Educations*, London, Dordrecht: Springer, 2010.
- [6] A. Bahr y A. Martinoli, *Vertex: A new distributed underwater robotic platform for Distributed Autonomous Robotic Systems*, Suiza: Springer, 2018.
- [7] J. Khatwani y V. Srivastava, «Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Solidified PLA Parts Fabricated By 3D Printing Process,» de *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, Punjab, India, Sringer Nature Singapore, 2019, pp. 95 - 104
- [8] R. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, Ciudad de México: Pearson Educación, 2017.
- [9] E. Brown, «THE LEGAL REGIME GOVERNING THE OPERATION OF AUVs,» de *TECHNOLOGY AND APPLICATIONS OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES*, London, Taylor & Francis Group, 2003, pp. 295 – 313.
- [10] S. Moore, *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*, Monterey, CA: Advanced Technology Education (MATE )Center, 2010.
- [11] D. Brutzman y Y. Kanayama, *Integrated simulation for rapid development of autonomous underwater vehicles.*, Washington, D.C.: IEEE, 1992.