

Vehículo submarino de 6 grados de libertad para inspección interna de tuberías

Dr. Rony J. Caballero

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, rony.caballero@utp.ac.pa

Dr. Adán Vega Sáenz

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, adan.vega@utp.ac.pa

Dr. Aránzazu Berbey Alvarez

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, aranzazu.berbey@utp.ac.pa

José Rodríguez Sánchez

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, jose.rodriguez38s@utp.ac.pa

RESUMEN

La inspección internas de túneles de hidroeléctricas, tuberías de presión, cascos de barco y lugares muy cerrados dentro de estructuras sumergidas requieren la utilización de un vehículo submarino operado remotamente. Sin embargo, las inspecciones en aplicaciones como las mencionadas, requieren que el vehículo a diseñar presente características de potencia, maniobrabilidad, resiliencia y forma que le permitan trabajar adecuadamente sin comprometer su estructura ni sus componentes internos. De este modo, el vehículo debe tener propulsores que permitan suficientes grados de libertad, ser resistente a impactos y ser lo suficientemente pequeño manteniendo una apropiada forma hidrodinámica. Adicionalmente, debe contar con un sistema de control que le permita compensar perturbaciones inherentes en las condiciones extremas a las que se verá sometido y evitar así, que se presenten impactos peligrosos contra las paredes del túnel o tubería a inspeccionar.

El siguiente trabajo, trata del diseño conceptual del vehículo submarino para inspección de tuberías y el análisis de las posibles situaciones a las que se someterá el vehículo y los mecanismos a utilizar para mitigar las condiciones de operación del mismo

Palabras claves: 6 grados de libertad, inspección, tubería, vehículo operado remotamente.

ABSTRACT

The internal inspection of hydroelectric tunnels, pressure pipelines, ship hulls and submerged structures require the use of a underwater vehicle. However, inspections in applications such as these require the vehicle to present design characteristics of power, handling, and resilience and to enable it to work properly without compromising its structure and its internal components. Thus, the vehicle must have several degrees of freedom, multi-engine, impact-resistant materials, small size and good hydrodynamic shape. Additionally, the ROV must have a control system that allows you to compensate for disturbances inherent in the extreme conditions that will be placed under the vehicle at all times to prevent the submission shock or impact against the walls of the tunnel or pipe to be inspected.

The present work is the conceptual design of the underwater vehicle for pipeline inspection and analysis of the possible situations that will bring the vehicle and the mechanisms used to mitigate the same operating conditions

Keywords: 6 degrees of freedom, inspection, pipe, remotely operated vehicle.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño mecánico del vehículo submarino para inspección de tuberías fue desarrollado en base a una extensa revisión bibliográfica que permitió conocer en detalle las diferentes formas que presentan los ROV's que se han desarrollado. Entre los requerimientos de diseño para la inspección de tuberías en lugares confinados como las tuberías, destaca la capacidad de maniobrar con un radio de giro pequeño, poseer una estructura lo suficientemente robusta para soportar impactos que puedan comprometer la operación del vehículo; además, estar dotado de una serie de propulsores que le permitan una eficiente navegación dentro de tuberías con un diámetro superior a un metro.

En las siguientes partes de este documento se presentan los diferentes sistemas que componen al vehículo partiendo desde la creación del concepto, la ubicación de los motores, los sistemas eléctricos/electrónicos y de control y finalmente los sistemas de iluminación y video necesarios para una eficiente y eficaz inspección dentro de tuberías.

DISEÑO CONCEPTUAL

La forma es un factor de gran importancia en la conceptualización del diseño y se puede determinar utilizando el coeficiente de arrastre como método de cuantificar la forma del vehículo. El número de Reynolds es relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan ante un flujo dado, por lo que es una buena forma de determinar la forma del vehículo. En la figura 1, el menor coeficiente de arrastre se da para formas esféricas; por lo tanto, la forma escogida para partir con el diseño conceptual es una esfera.

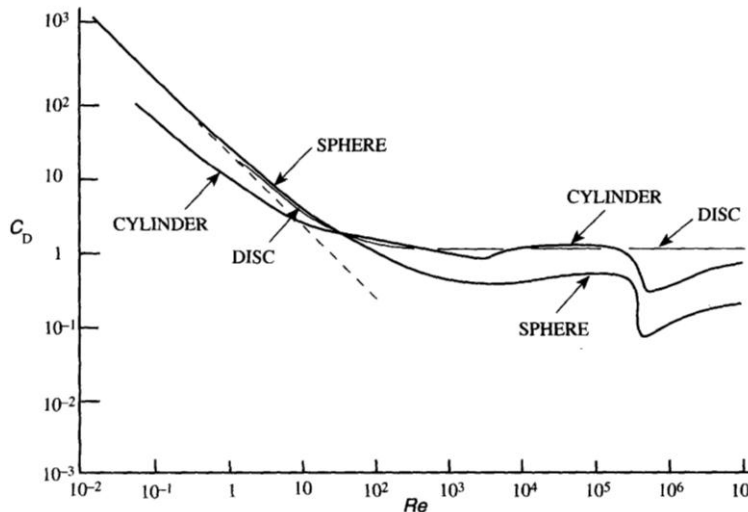


Figura 1. Gráfica logarítmica del coeficiente de arrastre C_d como función del Número de Reynolds Re , para esferas, cilindros (transversales y frontales). La línea punteada representa la ley de Stoke. Imagen: SMS-491, lecture 5, High Reynolds Number Flows. University of Maine.

La ubicación y cantidad de motores utilizados en el ROV toman las experiencias desarrollada en los vehículos submarinos de forma esférica desarrollados como el ODIN (*Omni-directional intelligent navigator*) (Choi, H.T et al, 2003), el URIS (*Underwater Robotic Intelligent System*) (Batlle J. et al, 2004) y finalmente el *Deep Phreatic Thermal Explorer* (DEPTHX) [3]. El ODIN desarrollado por la Universidad de Hawái tiene ocho propulsores los cuales le brindan la posibilidad de moverse con seis grados de libertad. El URIS fue desarrollado por la

Universidad de Girona en España, tiene seis propulsores que le permiten moverse en seis grados de libertad. El DEPTHX es un vehículo submarino prototipo que tiene como objetivo explorar cavernas subterráneas, la robustez de su diseño le permite navegar en condiciones similares a las contempladas en el diseño del ROV para inspección de tuberías.

Finalmente la cantidad y ubicación de los motores, la ubicación de las cámaras y la forma del vehículo son como se muestra en la figura 2.

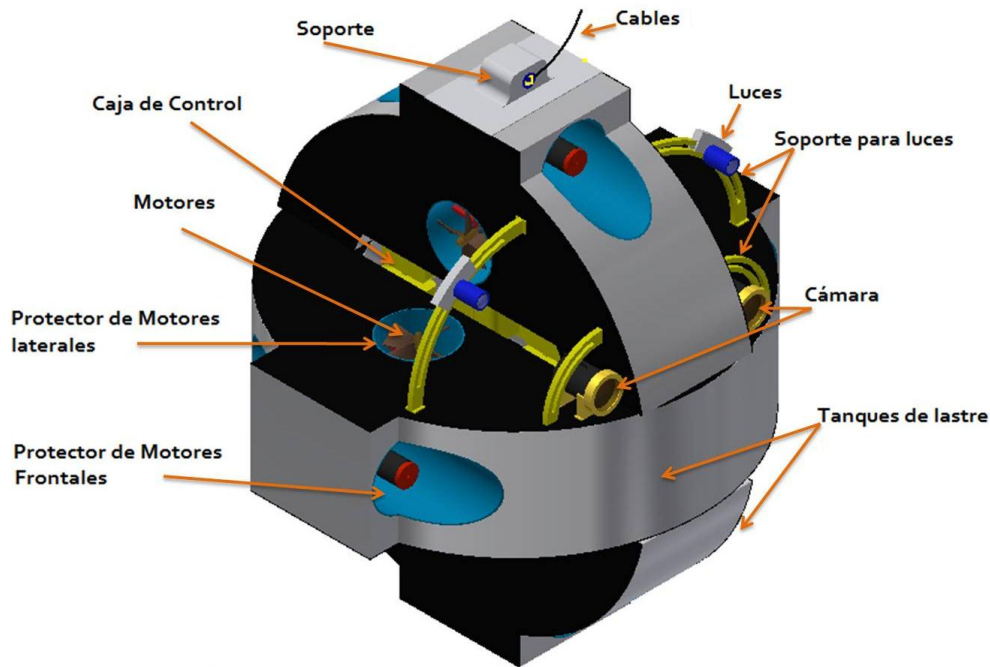


Figura 2: Principales componentes que forman parte del vehículo submarino para inspección de tuberías en su etapa de conceptualización, ubicación de motores, cámaras, cable umbilical, luces y demás componentes.

Este diseño conceptual toma en cuenta las condiciones de operación a las cuales se verá sometido el vehículo, se pensó en una forma esférica similar a los ya desarrollados en Hawai (Choi, H.T et al, 2003) y España (Batlle J. et al, 2004) sin embargo, construir un vehículo de bajo costo que presente un casco esférico lo hace un poco complicado de formar, ya que el material que se utilizaría debe ser, estructuralmente, resistente a impactos y a la vez lo suficientemente dúctil para absorber la energía producto de choques contra paredes u otros obstáculos que se encuentren en la tubería, este tipo de material debe ser un metal o algún tipo de polímero y para ambos, aún es complicado formar un casco esférico en Panamá. Finalmente se optó por diseñarlo bajo el concepto de anillos, el cual consiste en una estructura metálica de soporte cubierta por láminas del mismo metal, de tal forma que sea hueco y pueda funcionar como lastre. Este mismo anillo funciona como protección lateral y frontal para los motores. Otro aspecto a mencionar es la ubicación y protección de las cámaras y las lámparas. Las lámparas van dentro de una carcasa donde se pueden desplazar sobre un riel o soporte que también le brindan protección. Las cámaras serán ubicadas dentro de una carcasa y ancladas a la estructura del vehículo por medio de un soporte; adicionalmente, se le colocó un soporte para luces justo sobre las cámaras para que le brinden mayor protección y flexibilidad para variar el ángulo de las lámparas.

El diseño conceptual requería de robustez y facilidad de maniobra en espacios confinados por lo cual se optó por utilizar una forma esférica con un sistema de propulsión de 8 propulsores con sus respectivas hélices capaces de

moverse en ambas direcciones. El vehículo poseerá 6 grados de libertad (6 DOF) y el posicionamiento de los motores está basado en la configuración de un vehículo con navegación omni-direccional (Choi, H.T et al, 2004). La cantidad de grados de libertad se justifica por la necesidad de maniobrar con la mayor libertad posible, por esta razón se han seleccionado motores que permiten moverse en ambas direcciones manteniendo la eficiencia y poseen una potencia máxima de 400 W. Cada uno de estos motores se aloja en la estructura del vehículo para brindarle soporte y protección. Los soportes estructurales son los elementos que permitirán la rigidez necesaria para que el vehículo soporte impactos y la presión del agua. Para soportar una presión a una profundidad entre 25 y 30 m las presiones están entre 245 kPa y 294 kPa por lo cual se planea utilizar aluminio como material de soporte. En la siguiente tabla se resume de los principales aspectos que presenta el vehículo submarino para inspección interna de tuberías

Tabla 1: Principales Características del vehículo submarino para inspección interna de tuberías

Característica	Descripción
Ambiente de operación	Agua dulce (lago Gatún y estructuras aledañas). Agua Salada (puertos y estructuras sumergidas)
Densidad agua salada/dulce + sedimentos @ 25°C	1024 kg/m ³ / 1002 kg/m ³
Profundidad de operación	100 m (0.98 Mpa)
Profundidad de diseño	300 m (2.94Mpa)
Temperatura de operación	20 – 38 °C
Movilidad	Seis Grados de libertad (<i>surge, sway, heave, yaw, pitch, roll</i>)
Velocidad de operación promedio	200 cm/s
Flotabilidad	Neutra – positiva
Peso máximo	50 kg
Sistema de comunicación y alimentación	Cable umbilical
Instrumentos para navegación	IMU (<i>Inertial measurement unit</i>)
Características cualitativas	Robustez, Maniobrabilidad, Confiabilidad, facilidad en el transporte.

2. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO

Para la optimización del diseño mecánico a partir del diseño conceptual se realizaron simulaciones hidrodinámicas en donde se podría determinar la forma óptima con el menor coeficiente de arrastre, los niveles de presión y velocidad experimentados en una tubería con un diámetro dado y de este modo corregir o modificar el diseño mecánico del vehículo.

2.1. DISEÑO MECÁNICO Y SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS

El análisis numérico del comportamiento hidrodinámico de un vehículo tipo robot submarino es de por sí complicado y consume gran cantidad de tiempo y poder computacional. Mas sin embargo, es una poderosa herramienta a la hora de lograr un diseño óptimo y ayuda a reducir los costos de inversión para la elaboración de un nuevo producto, pues se disminuyen los costos en materiales destinados a pruebas, prototipos, etc. El estudio hidrodinámico contempla el cálculo del coeficiente de arrastre del vehículo a la velocidad de operación y el estudio de un propulsor para determinar su comportamiento en una de las ubicaciones dadas.

2.1.1. COEFICIENTE DE ARRASTRE DEL ROV

Para la determinación del coeficiente de arrastre del vehículo se recurrió a la dinámica de fluidos computacional, la cual es una herramienta que abaratará costos en el diseño de experimentos y nos permite realizar simulaciones que emulen condiciones realistas con mínimo porcentaje de error de acuerdo a los parámetros estipulados tanto en el pre-proceso, proceso y post-proceso en el software utilizado para realizar el análisis numérico. El coeficiente de arrastre del vehículo para una velocidad de 200 cm/s con un flujo frontal, lateral y a un ángulo de 45 grados se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2: Coeficiente de arrastre Cd para un desplazamiento frontal, lateral y a 45 grados.

Dirección del desplazamiento	Frontal (<i>Bøe. C et al, 2011</i>)	Lateral	45 Grados
CD	0.47	0.93	1.05

2.1.2 CONTORNOS DE PRESIÓN

Los contornos de presión en el vehículo nos muestran, con exactitud, los niveles de presión que se dan a lo largo del vehículo cuando son sometidos a diferentes velocidades o configuraciones. En la figura 3 se puede apreciar los diferentes escenarios en los que se realizaron las simulaciones hidrodinámicas. Para el caso a, se tiene que la mayor presión se distribuye en la parte frontal del vehículo, en donde la velocidad es menor. Después la presión baja en las partes laterales del ROV. En el caso b, existen una área mayor en donde la presión tiene niveles altos, esto es debido a la forma lateral plana del vehículo lo cual puede ser un problema ya que la fuerza que ejerce el fluido sobre el ROV es mucho mayor que en la dirección frontal y esto podría crear inestabilidad en el sistema. Sin embargo; la posición lateral no es de gran importancia en el desplazamiento del ROV ya que estas posiciones las tendrá en situaciones con velocidades de flujo bajo. También, el sistema de control tomara estas situaciones como perturbaciones a compensar para reducir la inestabilidad del vehículo. En el caso c, se tiene una situación que se podría presentar en los momentos en los que se desea girar. En este caso los niveles de presión están distribuidos entre las secciones anilladas del vehículo; nuevamente, para el sistema de control estos resultados son de gran importancia para determinar parámetros de control.

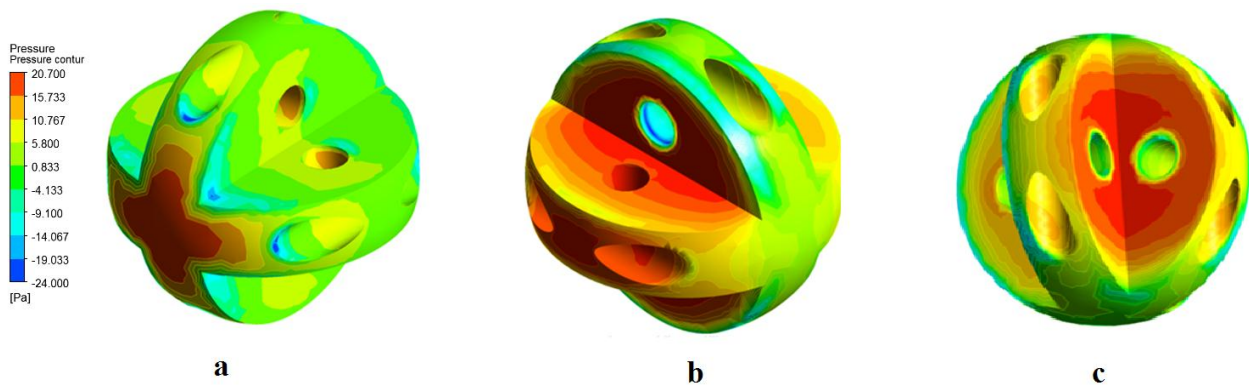


Figura 2: Graficas de contornos de Presión para diferentes desplazamientos del vehículo. a) Desplazamiento del ROV con flujo frontal, b) Desplazamiento del ROV con flujo lateral, c) Desplazamiento del ROV con un flujo a 45 grados.

2.1.3. CONTORNOS DE VELOCIDAD

Los contornos de velocidad nos muestran la magnitud de la velocidad del flujo del agua cuando pasa a través del vehículo en la tubería. Estas graficas son de gran importancia para determinar la ubicación de componentes visuales y de iluminación necesarias para las inspecciones; la ubicación de las cámaras y luces debe estar en las regiones en donde la velocidad del agua es baja en comparación con las demás partes del vehículo, esto se debe a la posibilidad de vórtices que de algún u otro modo afectarían negativamente la visualización del lugar inspeccionado. En la figura 3 se muestran los perfiles de velocidad obtenidos bajo las mismas condiciones sometidas para la determinación de los coeficientes de arrastre y los niveles de presión.

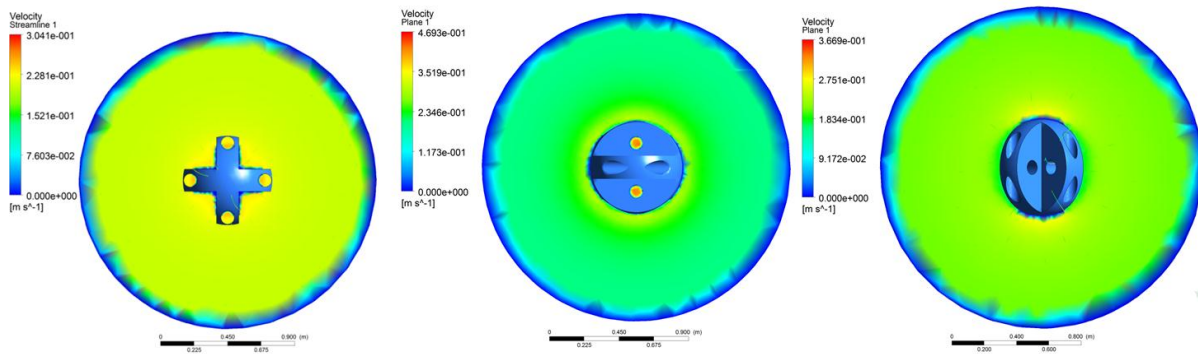


Figura No. 3. Velocidades del ROV al girar el vehículo en posiciones frontal, lateral y a 45 grados y con tubería a 90 grados lateral.

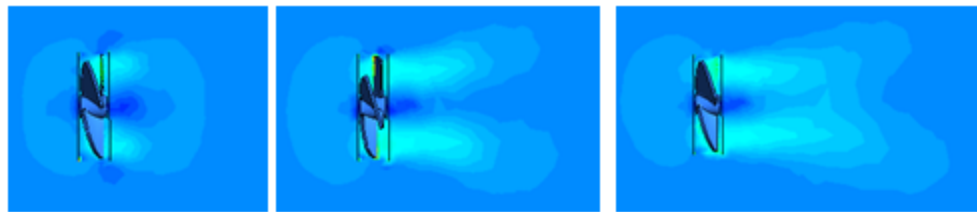
2.1.4 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE LA HÉLICE DEL MOTOR

Estas simulaciones buscaban determinar el comportamiento de la hélice del motor bajo diferentes condiciones para dimensionar las hélices apropiadas para el vehículo. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

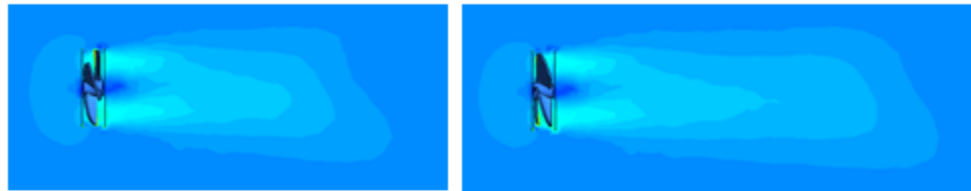
Tabla 3. Características finales de la hélice

Características finales de la hélice	
Número de palas	4
Diámetro	0.072 m
Paso	0.063 m
Ángulo de paso	15.6°
Área del disco	$4.072 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Área desarrollada	$3.46 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Empuje neto a generar	0.312 N
Velocidad angular a máximo η	420 rpm
J diseño	0.396
K_t diseño	0.237
K_Q diseño	0.0342
Espesor promedio	2 mm
Sentido de rotación	dextrógira

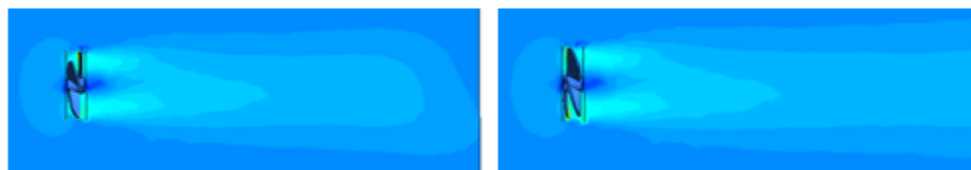
Se realizaron análisis en estados estacionarios y en estado transitorio para poder apreciar la generación de la estela y el momento en que se vuelve estable. En la figura 4 se muestra una foto secuencia de la simulación en estado transitorio.



perfiles de 0 a 0.4 segundos



De 0.9 a 1.3 segundos



De 1.6 a 2 segundos



De 3 a 5 segundos



Figura No. 4. Perfiles de velocidad durante 6 segundos en estado transitorio

En la figura se observa en los perfiles la estela generada por el movimiento de rotación de la hélice va aumentando durante los primeros 2 a 3 segundos. A partir de ahí se estabiliza formando un patrón a los 0.2 metros

de distancia desde la hélice con velocidades entre 0.35 y 0.45 m/s. Los contornos más pequeños de velocidad sobrepasan el dominio pudiendo llegar hasta el doble de distancia. (Bartrons, J. et al, 2011)

2.2. ESPESOR DEL CASCO DEL SUBMARINO

Debido a la linealidad de las de la ecuación que rige las presiones de los fluidos a cuerpos inmersos en ellos; el desplazamiento máximo es de 0.24 mm en un casco de aluminio a profundidades de operación entre 25 y 30 m. Se realizaron simulaciones con láminas más gruesas y se determinó que las láminas de 1/16 de espesor cumplen con los requerimientos ya que utilizar una lámina de un espesor mayor encarecería la fabricación del mismo y el sobredimensionamiento no sería necesario para las profundidades de operación; adicionalmente, el factor de seguridad de las láminas de 1/16 a las profundidades de 30 m es de alrededor 8. En la figura 5 se muestra una simulación para el caso extremo de llevar al vehículo a profundidades de 100 metros.

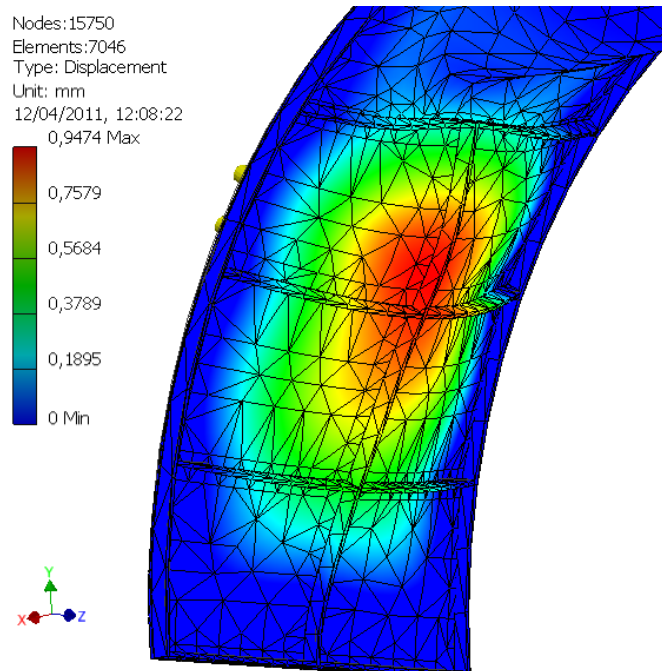


Fig. 5. Desplazamientos de la estructura del casco ante una presión de 1 MPa producida por el agua a 100 m de profundidad.

3. DISEÑO OPTIMIZADO

Luego de las simulaciones hidrodinámicas se tomaron en consideración los diagramas de los contornos de presión para las situaciones de flujo cuando el vehículo está en posición frontal y lateral. Las mejoras realizadas al diseño conceptual se basan, principalmente, en suavizar las partes del casco del vehículo y disminuir el área de contacto frontal con el fluido. La forma del casco condiciona la distribución de esfuerzos sobre el ROV y las cargas de arrastre en el momento de desplazarse. El casco está conformado por anillos de aluminio, que se construirán a partir de una lámina rollada con doble curvatura y soldada. En el interior se reforzará con rigidizadores, también de aluminio. Para la instalación de los propulsores se utilizarán cuatro para el desplazamiento frontal dos para el vertical y dos para los laterales; las combinaciones entre los propulsores permitirán los tres movimientos angulares. Estos componentes se fabricarán con láminas de aluminio rolladas y cortadas con la curvatura del casco y soldadas al mismo.



Fig. 6. Diseño optimizado del vehículo submarino para inspección interna de tuberías. Se puede notar el cambio en la forma del ROV al suavizar los anillos de lastre.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló el diseño conceptual del vehículo submarino para inspección de tubería el cual es la base para desarrollar un diseño óptimo que permita realizar las labores de inspección requeridas

Se desarrollaron análisis hidrodinámicos relacionados a los coeficientes de arrastre del vehículo para diferentes direcciones de flujo que ayudaran a determinar las fuerzas de arrastre sobre el ROV. Los análisis desarrollados para dimensionar el tamaño de la hélice para cada uno de los motores, fue de gran ayuda para la optimización del diseño; por último, los análisis de esfuerzos nos permitieron establecer el espesor del casco del robot para evitar deformaciones severas y resistir a impactos.

Se optimizo el vehículo submarino para inspección interna de tuberías a través de herramientas computacionales, modificando factores como la forma, dimensiones, potencia y ubicación de componentes.

5. REFERENCIAS

Choi, H.T.; Hanai, A.; Choi, S.K.; Yuh, J. (2003) "Development of an underwater robot, ODIN-III" Dept. of Mech. Eng., Hawaii Univ., Honolulu, HI, USA

Battle J., Ridao P., Garcia R., M. Carreras, Cufí X., A. El-Fakdi, D. Ribas, T. Nicosevici, E. Battle (2004) "URIS: Underwater Robotic Intelligent System" Computer Vision and Robotics Group. University of Girona, Spain

Stone, W. (2007). "Design and Deployment of a 3D Autonomous Subterranean Submarine Exploration Vehicle" Stone Aerospace / PSC, Inc.

Bøe, C. Vega, A. Caballero, R. (2011) "CFD simulation of an ROV" School of Mechanical Engineering – Universidad Tecnológica de Panamá.

Bartrons, J. Vega, A. Caballero, R.(2011) "Estudio y simulación cfd de una hélice para propulsión de un rov". Laboratorio Especializado en Procesos de Unión y Manufactura, Universidad Tecnológica de Panamá.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito