

GOLIATH: PLATAFORMA SUBACUÁTICA DE BAJO COSTO COMO TRANSPORTE DE SENSORES PARA MEDICIÓN DE CORRIENTES SUBACUÁTICAS

Goliath: Underwater platform of low cost as transport of sensors for measurement underwater flow

RESUMEN

La constante búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable, nos direcciona al estudio detallado de entornos subacuáticos que representen una alternativa potencial en el campo energético. Para esto, con el presente trabajo se logran establecer las características principales de un proceso de diseño de un Vehículo Subacuático Programable (VSP) como una metodología que permite dimensionar y construir un prototipo funcional confiable operacionalmente, que garantice el transporte de instrumentos de medición para la caracterización de una corriente subacuática, con materiales renovables como el PVC y conceptos fundamentales como la variación del centro de gravedad.

JAIME ALBERTO VALENCIA

Ingeniero Mecánico
Universidad del Valle
java0784@gmail.com

PALABRAS CLAVES: CFD, Estabilidad, Exploración, Hermeticidad, Subacuático, Prototipo, PVC, Sensores, VSP.

ABSTRACT

The constant search of new sources renewable energy, directs us an intense study of underwater environments that represent a potential alternative in the energy field. Therefore, this study pretend to establish the main features of design process for a Programmable Underwater Vehicle (PUV) such as methodology to evaluate and to build a prototype operationally reliable, to ensure the transport of measuring instruments to characterize an underwater flow, with renewable materials such as PVC and fundamental concepts like variation the gravity center.

KEYWORDS: CFD, Exploration, Prototype, PVC, Sealing, Sensors, Stability, Underwater, VSP.

1. INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta está cubierto por un 75 por ciento de agua y por este motivo, los océanos poseen un alto potencial energético debido a su capacidad para absorber y almacenar energía en forma de calor, lo cual altera sus propiedades físicas provocando cambios en las características dinámicas de las masas de agua oceánica. Estos cambios provocan que el océano se comporte como un regulador del clima terrestre, a través de la circulación de dichas masas de agua, lo que representa un gran potencial energético presente en las corrientes oceánicas en forma de energía cinética [1].

El desconocimiento de los parámetros que se involucran en la circulación oceánica, referentes a las características físicas y dinámicas de las masas de agua en circulación, dificulta la estimación del potencial energético disponible y su adecuado aprovechamiento, debido a esto, se hace necesario disponer de plataformas para el transporte de sensores con capacidad y versatilidad suficiente para operar bajo condiciones hostiles y con una alta autonomía en cuanto a la toma de decisiones sin asistencia humana.

Con el fin de realizar aportes a este campo de investigación, se lleva a cabo el presente proyecto, donde se definen inicialmente los criterios de mayor importancia que rigen el diseño de una plataforma subacuática, considerando las condiciones del medio de operación del vehículo, sus características básicas como la maniobrabilidad que está determinada por su capacidad para desplazarse y evadir obstáculos en su entorno de operación, donde características tales como su radio de giro, ángulo de inmersión y emersión, y los grados de libertad disponibles en el dispositivo que maximizan su funcionamiento, son el resultado de la adaptación de sistemas mecánicos gobernados por sistemas electrónicos que controlan tanto las funciones básicas de operación como las más exigentes necesidades en el tema de la adquisición de datos.

Al finalizar esta investigación, se pretende obtener un prototipo de Vehículo Subacuático Programable (VSP), que opere a una baja profundidad para evaluar conceptos de funcionamiento, tales como, la variación del centro de gravedad para direccionar el dispositivo, los momentos

de restitución que estabilizan el vehículo y la potencia requerida para propulsarlo.

2. CRITERIOS DE DISEÑO

Para diseñar un VSP, es indispensable considerar aspectos básicos de gran importancia, como los relacionados con el tipo de forma o configuración estructural, las cargas y puntos de aplicación presentes en el dispositivo, los esfuerzos inducidos por dichas cargas, los materiales de construcción relacionados con los esfuerzos inducidos, el proceso de fabricación, las condiciones de operación y los componentes mecánicos y electrónicos necesarios para su funcionamiento, con el fin de desarrollar técnicas de diseño confiables y justificar económicamente la viabilidad del proyecto.

En virtud de esto se identificaron los siguientes criterios de diseño:

- Tener capacidad para operar hasta 10 m.
- Disponer de una maniobrabilidad con radios de giro reducidos para desplazarse bajo el agua.
- Poseer una alta estabilidad operacional.
- Contar con autonomía de operación mínimo de 1 hora.
- Disponer de sistemas de emergencia para corregir fallos de funcionamiento.

Así mismo, se evidenció que dichos criterios se encuentran relacionados entre sí durante todo el proceso de diseño como se observa en la figura 1.

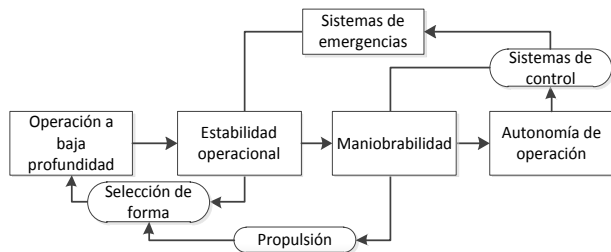


Figura 1. Relación entre criterios de diseño.

Operación a baja profundidad: Garantizar la integridad estructural y estanqueidad del VSP, bajo cargas hidrostáticas e hidrodinámicas, que permitan el seguro alojamiento de dispositivos de sensado y sistemas mecánicos y electrónicos que gobiernen su desplazamiento y control en las tareas de exploración subacuática.

Estabilidad operacional: Capacidad de recuperar su posición de operación después de enfrentar fuerzas externas que pretendan desestabilizarlo, la cual depende directamente de la forma geométrica del VSP.

Maniobrabilidad: Propiedades de funcionamiento que le permitan desplazarse en el fluido con versatilidad (bajos radios de giro), para llevar a cabo cualquier tipo de investigación subacuática. Para esto se considera el tipo de propulsión que utiliza para desplazarse y los sistemas de control que orientan su desplazamiento.

Autonomía de operación: Capacidad de operar durante un periodo de tiempo útil para la exploración subacuática. Esta propiedad está directamente relacionada con su consumo energético necesario para movilizar el volumen total del dispositivo.

Sistema de emergencia: Debe contar con la posibilidad de emerger desde una determinada profundidad a través de su flotabilidad que garantice su rescate en caso de una falla en su funcionamiento.

3. MEDICIÓN DE CORRIENTES SUBACUÁTICAS

El objetivo principal del VSP es transportar instrumentos de medición adecuados para caracterizar una corriente subacuática, que permitan determinar su magnitud y orientación. Por este motivo se identificó un posible método para la medición de corrientes subacuáticas que puede ser adaptado al dispositivo para cumplir con su objetivo.

Para caracterizar una corriente subacuática, se considera particularmente un volumen cúbico de agua en el cual el vehículo realizará la búsqueda de la corriente. Primero se divide el cubo en capas y en porciones, entendiendo por capas segmentos horizontales de agua y por porciones segmentos de agua verticales. Partiendo desde la superficie libre del fluido para una porción inicial y a partir de un extremo del cubo como punto de referencia, el dispositivo inicia su inmersión de manera tal que al llegar al extremo opuesto del cubo abarque una capa de agua determinada, esta exploración por capas de agua la hará hasta recorrer en su totalidad una porción del cubo hasta su máxima profundidad y realizará esta secuencia de operación para todas las porciones del cubo [2].

Dentro de esta secuencia de operación el vehículo subacuático dispone de un instrumento para la medición de la velocidad relativa entre su velocidad de avance y el fluido en este caso en reposo, ya sea una adaptación del tubo de Pitot o un sistema de propelas como contador de revoluciones. Dicha velocidad relativa debe ser caracterizada con anterioridad con las revoluciones del eje de propulsión del vehículo, de manera que se tenga una señal de retroalimentación. En el instante que se presente una corriente de agua subacuática habrá un

aumento en la velocidad relativa y el vehículo subacuático registrará esta variación, así como la profundidad y la posición geográfica a la cual se presenta dicho cambio de velocidad. Este registro lo hará a través de un sistema de adquisición de datos que transporta el vehículo para llevar un historial de análisis de todo el proceso [2]. Además el dispositivo debe tener la capacidad para mantener esa posición particular a la cual detectó la corriente de agua para medir su magnitud y su dirección. En este caso se estaría llevando a cabo un método Eurliano en donde se caracteriza una corriente de agua en un punto específico.

En el caso en que la velocidad de la corriente de agua subacuática sea mucho mayor a la velocidad del vehículo, éste verá afectada su trayectoria de operación y optará por dejarse llevar por dicha corriente, convirtiéndose en un instrumento de medición que incorpora sistemas, como por ejemplo un acelerómetro, para la medición de su posición inicial y el tiempo recorrido hasta su posición final. De este modo se aplicaría un método Lagrangiano.

4. DISEÑO DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO

Básicamente el vehículo se compondrá de un arreglo de cilindros sellados, por ser esta una forma de fácil construcción y estructuralmente más resistente [3], comparada con otras formas geométricas, la cual requiere menores espesores de pared para soportar presiones externas.

En la figura 2 se observa un diagrama de flujo que comprende, dentro de un proceso de diseño, los procedimientos establecidos para lograr un dimensionamiento de una propuesta de VSP. En la etapa de construcción de recipientes a presión, se consideran los parámetros de diseño del código ASME [4], que permiten determinar los espesores de los cilindros del VSP, a través la teoría de esfuerzos de membrana.

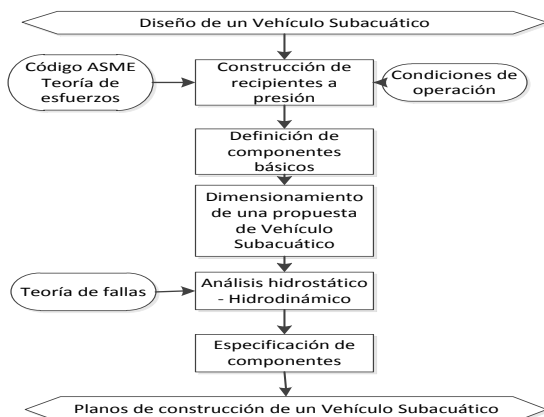


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de diseño de una plataforma subacuática.

En la etapa de definición de los componentes básicos se consideraron los de mayor importancia al momento de seleccionar los elementos que permiten el funcionamiento del VSP.

Propelas: Las propelas son uno de los componentes más importantes del sistema de propulsión. Son las encargadas de transmitir la potencia del motor al fluido y generar la fuerza de avance necesaria para impulsar el vehículo subacuático. Se utilizan propelas debido a que se requiere un menor número de componentes para construir el sistema de transmisión, comparado con un sistema de aletas, y por lo tanto se reducen las pérdidas mecánicas de potencia [5].

Engranes: Son elementos esenciales en la transmisión de potencia en el VSP. En los engranes rectos las pérdidas por rozamiento son menores comparados con engranes helicoidales y cónicos [6].

Ejes: Son utilizados como elementos de transmisión de potencia y están expuestos a cargas fluctuantes de flexión y torsión combinadas con varios grados de concentración de esfuerzos. El método recomendado para diseñar y analizar ejes es el de la teoría de falla por energía de distorsión [6].

Motores: Un VSP requiere incorporar una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento, de aquí el hecho que se utilicen motores de corriente directa como fuente de potencia para el dispositivo y bancos de baterías recargables.

Sellos: Representan elementos primordiales en la hermeticidad del vehículo subacuático. Permiten la transmisión de potencia desde el motor DC hasta la propela de impulso garantizando la estanqueidad del VSP, sacrificando eficiencia energética debido al efecto de la fricción entre el sello y el eje propulsor, y serán estos los que determinan la potencia total requerida por los motores DC para vencer el par torsor debido a la presión de contacto.

En el dimensionamiento del VSP se consideraron los siguientes aspectos:

Sistema mecánico: Para variar el ángulo de ataque con el cual el vehículo avanza en el agua y lograr tanto sumergirse como emerger, se implementó el concepto de la variación del centro de gravedad (C.G) del dispositivo [7]. En la figura 3 se observa la estructura interna del vehículo con el mecanismo básico para la variación del centro de gravedad, el cual consta de un peso móvil que se desplaza sobre un tornillo de potencia, accionado por un motor de corriente directa que transmite su potencia por medio de un arreglo de piñón y engrane, lo que produce el desplazamiento del peso en el interior del vehículo subacuático. Además se puede observar el

espacio dispuesto para los componentes electrónicos que controlan el dispositivo.

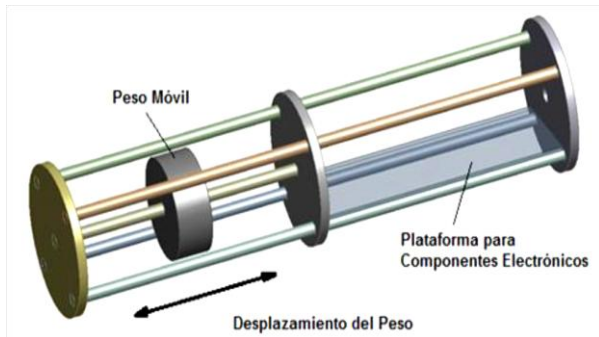


Figura 3. Sistema básico de variación del C.G.

Sistema electrónico: El sistema de control se basa en la utilización de un microcontrolador que es el encargado de gobernar todo el funcionamiento del VSP y además se encarga de la recolección y el análisis de datos provenientes de los sensores montados en el dispositivo.

Material: En la Tabla 1 se realiza la evaluación de los criterios de selección más significativos, de acuerdo a las características de cada material, para las alternativas más utilizadas en este campo. Con una escala de 0 a 5, siendo el 5 el mayor valor de factibilidad.

CRITERIO	MATERIAL				
	ALUMINIO	FIBRA DE VIDRIO	FIBRA DE CARBONO	ACERO INOX.	PVC
A	4	3	4	5	3
B	5	5	5	5	5
C	3	4	4	2	4
D	5	3	3	4	5
E	4	3	3	4	4
F	2	3	2	1	5
Factibilidad	23	22	21	21	26

- A. Resistencia al estado de esfuerzos inducidos en un cilindro de pared delgada.
 B. Resistencia a la corrosión.
 C. Baja densidad (liviano).
 D. Fácil adquisición en el mercado (Forma cilíndrica).
 E. Fácil manufactura.
 F. Mayor economía (bajo costo).

Tabla 1. Evaluación de factibilidad de materiales.

Centros de flotabilidad y gravedad: Se consideró el centro geométrico de cada cilindro, el cual corresponde por simetría a su eje longitudinal. Dichos centros se unieron a través de líneas a cada lado del dispositivo y se determinó un centro geométrico común, que se intercepta con el plano medio vertical del vehículo. Para la ubicación del centro de gravedad se estableció que la disposición interna de los componentes mecánicos y electrónicos quedara preferiblemente en la parte inferior de cada cilindro, de tal manera que el centro de gravedad en el cilindro este bajo su centro geométrico. Finalmente,

se procedió de la misma forma para determinar un centro de gravedad común para el VSP como se realizó para el centro de flotabilidad (figura 4).

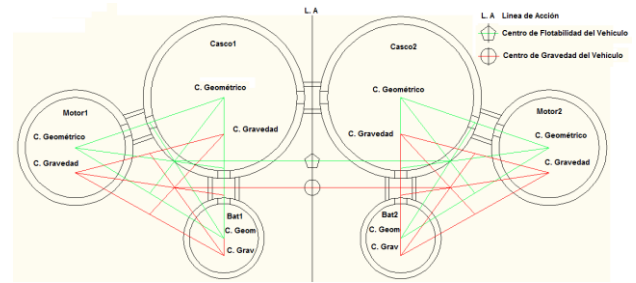


Figura 4. Centros de flotabilidad y gravedad.

5. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Como material de construcción del casco se seleccionó el PVC que cumple con las propiedades estructurales [8] necesarias para las condiciones de operación del VSP. Además, este material presenta la ventaja de encontrarse en el mercado en diferentes presentaciones cilíndricas a bajo costo comparado con los materiales analizados anteriormente.

Compartimientos: Para la construcción de los cascos principales, se utilizaron dos cilindros de 3 pulgadas de diámetro y 20 cm de longitud (figura 5). Para los compartimientos de los sistemas de propulsión se recortaron dos cilindros de 10 cm de largo y 2 pulgadas de diámetro, y para los compartimientos de baterías se utilizaron dos secciones de tubo de 1 ½ pulgada y 15 cm de largo. Los cilindros de 2 y 1 ½ pulgada se sellaron por sus extremos con tapones de presión, del mismo material, y los de 3 pulgadas con tapones roscados para facilitar su inspección.

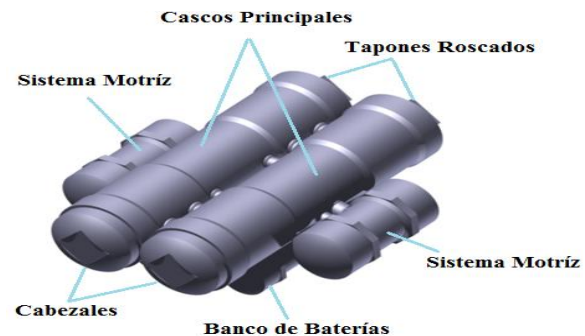


Figura 5. Estructura de la plataforma subacuática.

La sujeción entre los cilindros se realizó por medio de tornillos de ¼ pulgada y a través de tubos roscados metálicos de 3/8 pulgada para la comunicación interna entre los diferentes cascos, por los cuales pasan cables de conexión (figura 6).



Figura 6. Conexiones y tornillos de sujeción.

Estructura interna: Se construyó una armadura compuesta por varillas roscadas con un diámetro de $\frac{1}{4}$ pulgada, que sujetan los discos de refuerzo (figura 7), que sirven para fortalecer el casco del dispositivo y para dividir los compartimientos donde se alojan los componentes electrónicos y mecánicos.



Figura 7. Estructuras internas.

Sistema de propulsión: Se construyó una caja reductora para transmitir la potencia desde el motor de corriente directa hasta la propela, que genera el impulso para el desplazamiento del dispositivo. El sistema se monta sobre una estructura similar a la construida para los cascos principales con discos de refuerzo, con los cuales se elaboró el arreglo de engranes en el sistema de transmisión (figura 8).

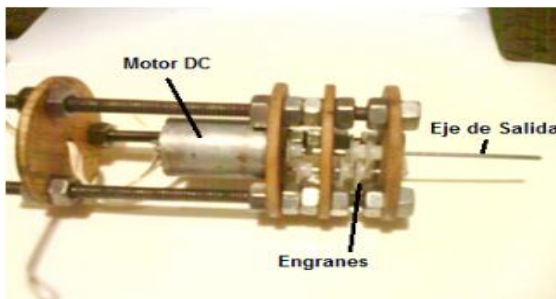


Figura 8. Sistema motriz.

Para garantizar la hermeticidad del prototipo y prevenir cualquier tipo de filtración en los compartimientos de los motores, se construyeron dos tipos de sellos, uno de

silicona y otro de hule, montados sobre el eje de propulsión que va hacia la propela (figura 9a).

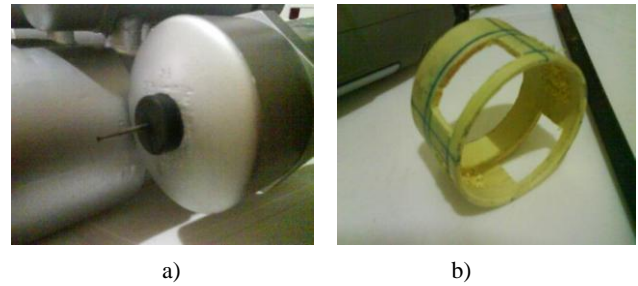


Figura 9. Sistema de propulsión. a) Sellos en el eje de propulsión. b) Túnel de succión.

La propela se acopló a un túnel de succión para direccionar el flujo de agua que pasa a través de ella, después de transmitir toda la potencia proveniente del motor DC. El túnel de succión se construyó con una unión de PVC de 2 pulgadas de diámetro, a la cual se le realizaron aberturas para crear un área de entrada mayor que la de salida (figura 9b), y así direccionar el flujo de agua que sirve de propulsión.

Sistema de control: Para construir el sistema para la variación del centro de gravedad del dispositivo y lograr controlar el ángulo de ataque con el cual el prototipo se sumerge o emerge, se montaron dos rodamientos en dos discos de refuerzo de la estructura interna de los cascos principales, para soportar el tornillo de potencia sobre el cual el peso móvil se desplaza en el interior del dispositivo (figura 10).

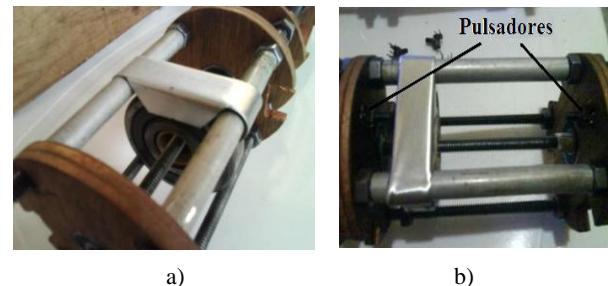


Figura 10. Sistema para variación del centro de gravedad. a) Soporte. b) Finales de carrera.

Además, se construyó un soporte en aluminio (figura 10a) para restringir el giro del peso móvil producido por el torque que se transmite desde el motor DC hasta el tornillo de potencia y de este modo permitir que el peso se desplace de manera lineal en el interior del VSP. Este soporte se desliza sobre bujes de aluminio que tienen como propósito proporcionar una superficie lisa que minimice la fricción en el momento del desplazamiento del peso móvil. La conexión entre el tornillo de potencia y el motor DC, se realizó con un arreglo de 2 piñones que permiten el ajuste del funcionamiento del motor a las revoluciones apropiadas para transmitir un torque útil y accionar el sistema de variación del centro de gravedad.

Para identificar el final de carrera del peso móvil en funcionamiento, se ubicaron pulsadores en cada uno de los discos de refuerzo que limitan el desplazamiento del peso (figura 10b). De esta forma, se dispone de un sistema con la posibilidad de enviar información referente a la posición del peso dentro del dispositivo y permitir por consiguiente la determinación del ángulo de ataque de inmersión o emersión con el cual opera el dispositivo.

6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL VSP

Propelas: La inclinación de los alabes de las propelas, con la cual transmiten la potencia al fluido, se determinó con un modelo en dinámica computacional de fluidos (CFD), en donde se simuló la propela en un túnel de agua virtual con una velocidad del flujo de 10 cm/s para determinar así el torque generado sobre la propela para diferentes ángulos de inclinación de sus alabes (figura 11), velocidad a la cual se probó la propela de manera experimental en el túnel de agua del laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad del Valle.

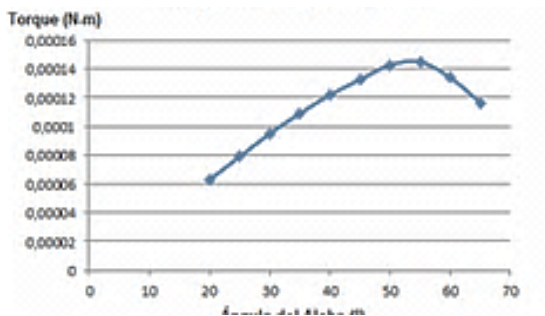


Figura 11. Torque generado para distintos ángulos del alabe.

Del análisis en el laboratorio en el túnel de agua, se determinó que el ángulo más eficiente para el diseño de los alabes de la propela es de 40°, para dicho ángulo se presentó la mayor cantidad de revoluciones por minuto a una misma velocidad del flujo de agua.

Túnel de succión: Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de propulsión se realizaron dos pruebas, que corresponden a la propulsión con túnel de succión y sin túnel de succión. Estas pruebas se realizaron con un cilindro de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 30 cm de longitud, sellados por sus extremos por tapones de presión, el cual alojaba el sistema de transmisión y los módulos de baterías. Aquí, se evidenciaron pérdidas de potencia por el uso del túnel de succión.

Desplazamiento: El VSP se sumergió hasta una profundidad de 2.20 m, profundidad máxima en la piscina de la Universidad del Valle (figura 12). De esta prueba se determinó inicialmente el valor de la velocidad de desplazamiento, 20 cm/s, haciendo referencia al

registro del tiempo que el dispositivo tardó en recorrer, en línea recta, una zona de pruebas de 2 m de longitud en un tiempo promedio de 10 s. Además se corroboró que no se presentaron filtraciones a esta profundidad, tanto por inspección visual como a través de los detectores de humedad instalados en el VSP y por la conservación de la flotabilidad positiva del vehículo. También se logró establecer el consumo de potencia eléctrica determinada por la descarga total de su fuente de energía, compuesta por un arreglo de 12 baterías para un voltaje total de 12 V, a una corriente de 600 mAh. La descarga de las baterías ocurrió en un tiempo de 1 hora, de donde se concluye que el consumo de potencia por hora está dado por:

$$P_h = 12 V \times 0.600 Ah = 7.2 Wh \quad (1)$$



Figura 12. Goliath en funcionamiento.

Estabilidad: Se realizó una prueba para garantizar que el dispositivo restablezca su posición de operación frente a cualquier fuerza externa que pretenda desestabilizarlo. La medición de una corriente subacuática mediante este tipo de plataformas debe incorporar dos métodos fundamentales; el Eurliano para caracterizar corrientes no mayores a 20 cm/s, velocidad máxima del VSP, con instrumentos de medición como el tubo de Pitot y/o propelas que permitan hallar el módulo y la dirección de una corriente en un punto específico; y el Lagrangiano que permita abarcar corrientes superiores a la velocidad de la plataforma convirtiéndose en un dispositivo de sensado incorporando un instrumento para registrar la magnitud y dirección de su desplazamiento respecto a un punto de partida establecido con anterioridad.

Al implementar un túnel de succión, se obtuvo una variación del 25 % en las velocidades de avance del dispositivo de prueba. Donde con túnel de succión el tiempo transcurrido para recorrer 32 cm fue de 2.1 s, es decir, una velocidad de 15 cm/s, y para la prueba sin túnel de succión el tiempo transcurrido para recorrer la misma distancia anterior fue de 1.6 s, lo que equivale a un desplazamiento a una velocidad de 20 cm/s. Por consiguiente, se observa que dentro del túnel de succión se presenta una obstrucción al flujo de agua, debido al diseño de la propela utilizada para las pruebas.

La distribución de los centros de gravedad y flotabilidad del Vehículo Subacuático representó la principal

propiedad fundamental en la búsqueda de la estabilidad operacional del dispositivo, cuanto mayor es la distancia que separa dichos centros, mayor es la capacidad del vehículo para recuperar su posición normal de funcionamiento después de verse afectado por una fuerza externa.

Para esta prueba se sostuvo el vehículo en la posición totalmente opuesta a la posición normal de operación y se liberó para que automáticamente recuperara su posición de equilibrio. De esta prueba se determinó que el dispositivo tarda aproximadamente 3 segundos para recuperar su posición de equilibrio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La potencia requerida para desplazar el vehículo subacuático a una velocidad de 20 cm/s, venciendo la fuerza de arrastre que impide su desplazamiento, fue de 7.2 W como potencia total consumida, la cual depende de factores tecnológicos tales como los tipos de sellos utilizados para los ejes de las propelas, los cuales proporcionan las mayores pérdidas de potencia debido al efecto de la fricción entre el sello y el eje propulsor.

En el dimensionamiento de un vehículo subacuático aparte de considerar las condiciones del medio de operación, se deben estimar inicialmente las dimensiones de los componentes internos que permiten su funcionamiento, para así definir el volumen mínimo necesario y lograr una mejor eficiencia energética.

Se recomienda implementar sellos más eficientes para las propelas que presenten menores coeficientes de rozamiento con el eje propulsor, para de este modo disminuir el consumo de energía y aumentar la eficiencia energética del vehículo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F.D. Ommanney. El Océano. 2 ed. Mexico : Fondo de Cultura Económica, 1953.
- [2] GUERRERO S, Jenniffer, Diseño de un dispositivo subacuático virtual para la evaluación de un perfil de corrientes subacuáticas, Universidad del Valle, Cali, 2011.
- [3] TIMOSHENKO, Stephen y VELA HUERGO, Julio. Teoría de la Elasticidad. Argentina : Editorial el Ateneo.
- [4] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII Division I. 2004.
- [5] E. MOLLAND, Anthony. The Maritime Engineering Reference Book. UK : BH, 2005.
- [6] AGUIRRE ESPONDA, Guillermo. Diseño de Elementos de Máquinas. UNAM Facultad de

Ingeniería Mecánica, Editorial Trillas, México, 1990.

- [7] Katsuyoshi Kawaguchi, URA Tamaki, Yosibumi Tomoda and Heihachiro Kobayashi, Development and Sea Trials of a Shuttle Type AUV "ALBAC", School of Marine Science and Technology, Department of Marine Mineral Resources, Tokai University, Japan. 1992.
- [8] PAVCO. Manual técnico: Tubosistemas, Biaxial PVC biorientado dúctil. Laboratorios de Ensayos en Tuberías y Accesorios de PVC, 2008.