

Sistema de inmersión-emersión y estabilización para un vehículo submarino autónomo, manipulado mediante un algoritmo de control retroalimentado.

Immersion-emersion and stabilization system for an autonomous submarine vehicle, handled by feedback control algorithm.

José Luis Hernández Ameca* (1).

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación, Laboratorio de Sistemas Robóticos "SIRO".

joseluis.hdzameca@correo.buap.mx.

Enrique Cortés Rodríguez (2). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación, Laboratorio de Sistemas Robóticos "SIRO", enrique050993@gmail.com.

Elsa Chavira Martínez (3). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación, elsachavira56@hotmail.com.

Luis Enrique Colmenares Guillen (4). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación, lecolme@gmail.com.

*corresponding author.

Artículo recibido en diciembre 05, 2019; aceptado en diciembre 16, 2019.

Resumen.

La presente investigación se enfoca al problema de inmersión-emersión y la estabilización de un vehículo submarino autónomo para la exploración de ambientes acuáticos, el cual ha sido de gran interés para investigadores y científicos de las áreas de eléctrica-electrónica, computación, robótica y control. Se propone diseñar, implementar y evaluar un sistema de control retroalimentado propio con base en los trabajos referenciados en este artículo. Una vez desarrollado el sistema se realizaron experimentos para comprobar el sellado, flotación, principio de Arquímedes, estabilidad del casco, movimientos de inmersión-emersión y se evaluó el sistema de estabilización registrando el comportamiento de las bombas en las cámaras de lastre. Como resultados se presentan el diseño realizado en computadora de la cámara de lastre y casco, tablas de activación de bombas, velocidades de inmersión-emersión y gráficas de masa contra tiempo. De acuerdo a la observación y cálculos, se comprobó que, el casco flota cuando su peso es menor que la fuerza de empuje, se observó que a mayor masa la velocidad de inmersión es mayor y a menor masa la velocidad de emersión es mayor.

Palabras clave: Algoritmo, Equipo acuático, Motores, Prototipo, Vehículos.

Abstract.

This research focuses on solving the problems of immersion-emersion and stabilizing an autonomous submarine vehicle to explore aquatic environments, which has been of great interest in areas such as electronics, computer, robotics and control. It is proposed the design, implementation and evaluation of a feedback control system based on the works referenced in this paper. Once the system was finished, experiments were performed to test the sealing, flotation, Archimedes principle, hull stability, immersion-emersion movements and the stabilization system was

evaluated registering the behavior of the pumps in the ballast chambers. As results, the computer design made of the ballast chamber, pump activation tables, immersion-emersion speeds tables and mass versus time graphics are presented. According to observations and the calculations, it has been verified that the hull floats when its weight is less than the pushing force. It has been observed that with greater mass the immersion speed is lower and with a lower mass the emersion speed is higher.

Keywords: Algorithm, engines, prototype, underwater equipment, vehicles.

1. Introducción.

Para investigadores y científicos los vehículos acuáticos sumergibles han sido un tema de interés durante las últimas tres décadas, donde el problema general es el diseño y construcción de vehículos submarinos pequeños, versátiles y no tripulados, con diferentes objetivos como realizar misiones de exploración y explotación de recursos en aguas profundas, levantamiento oceánico profundo, rastreo de cables y tuberías, aplicaciones militares, mapeo detallado del fondo marino para infraestructura submarina, mantenimiento de observatorios de fondo marino, campos petrolíferos sumergidos y recuperación de estaciones bentónicas entre otras (O. Gherairi, 2017).

De acuerdo a la literatura la estabilidad, velocidad y profundidad son parámetros que permiten controlar las posiciones y movimientos de los vehículos submarinos autónomos (AUV). Para realizar dicho sistema de control se han reportado diferentes métodos, técnicas y sistemas.

Existen diferentes trabajos que proponen diversas soluciones al problema de estabilidad, emersión e inmersión de un AUV, como en (S. A. Woods, 2012) el cual describe dos sistemas de control de balastro variable, el primero proporciona un control de profundidad, mientras que el segundo permite ajustar el centro de gravedad a lo largo del eje horizontal fijo del cuerpo del AUV, se presenta una descripción de las ecuaciones de movimiento, el diseño y la implementación de los tanques de lastre, y se describen los controladores desarrollados.

En (A. Agrawal, 2014) se formula un modelo dinámico sobre los parámetros del sistema de hardware para determinar la velocidad de elevación y las posiciones de profundidad alcanzables para varias entradas del perfil de potencia. Las pruebas experimentales muestran que el control de flotabilidad, tal como se explica en las simulaciones, se realizó en el prototipo desarrollado que valida la eficacia del sistema.

También se han desarrollado nuevas estrategias de control proporcional integral derivativo (PID) como en (G. Antonelli, 2001; X. lin, 2009) donde permiten que los AUV trabajen en colaboración con los sistemas de lastre variable delantero y trasero. El suministro de energía interno y las mediciones del ángulo se filtraron utilizando un filtro pasa bajas. Los resultados muestran que los sistemas trabajan juntos de manera efectiva para lograr la profundidad y el peso deseados.

El sistema de lastre para AUV también se ha controlado con una arquitectura jerárquica como en (A. Bi, 2018) donde se propone un sistema basado en un sistema variable tipo on-off, sin embargo, no se ha tomado en cuenta la influencia de perturbaciones externas a los AUV.

El modelo propuesto en (H. Mohiuddin, 2014) y (J. Szymborski, 2002) con motores Stirling como sistemas de propulsión hacen que el submarino sea confiable y económico. Sin embargo, tiene algunas deficiencias, como la incapacidad de aplicación para obtener información altamente precisa debido a la falta de un sistema de control inteligente, y también algunas fallas internas.

En (T. Wang, 2011) se presenta un nuevo tipo de estructura de robot submarino en forma de plato, este fue optimizado por los resultados de la simulación hidrodinámica. Estos resultados dieron una referencia importante a la estimación de la fuerza, el diseño de maniobrabilidad y el análisis del robot en forma de plato.

En el diseño de piezas y estructuras para AUV se ha utilizado herramientas de diseño asistido por computadora como en (Z. Liu, 2011) en el cual se presenta un modelo 3D recientemente mejorado de varias hélices de chorro de agua, la estructura del robot se ilustra brevemente. Para superar las propiedades indeseables del modelado en 2D, se diseña un modelado más preciso, que adopta un sensor de celda de carga de 6 ejes para detectar las fuerzas de propulsión en las direcciones de los ejes (x,y) y los pares simultáneamente. Posteriormente, se llevan a cabo una serie de experimentos submarinos para descubrir las relaciones cerradas entre los ángulos de regulación en el plano horizontal, vertical, las fuerzas y momentos generados por una sola hélice en el robot. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de propulsión avanzado es mucho más apropiado para estudiar en robots submarinos.

Para resolver el problema de hundir un cuerpo en agua se debe tomar en cuenta principios de la física y algunas leyes fundamentales, especialmente el principio de Arquímedes como en (G. Antonelli, 2008) donde el objetivo principal de dicha investigación es diseñar y fabricar un prototipo de submarino para que esté disponible experimentalmente. Se cumple con la necesidad de un diseño económico e innovador para garantizar un prototipo: inteligente, con propulsión, sistema de buceo y sistema eficiente de energía. Los sistemas de propulsión y potencia son proporcionados por motores y una batería. La comparación de la clasificación de profundidad con otros submarinos hace que el prototipo sea único en algunos casos. Sumergir hidrostáticamente este diseño implica básicamente el principio de Arquímedes y la fuerza de flotación, donde la flotabilidad negativa se ejerce ya sea aumentando su peso o disminuyendo su desplazamiento de agua.

En este documento se propone una solución para resolver el problema de inmersión-emersión y estabilización de un AUV, mediante un algoritmo de control retroalimentado, un diseño propio de cámaras de lastre y casco, para lo cual se utilizó un software de diseño asistido por computadora (CAD). En la segunda sección se presentan la metodología, materiales, diagramas e ilustraciones utilizados para el desarrollo de este trabajo. La tercera sección describe los diferentes experimentos realizados que permitieron observar, registrar, validar y reportar el funcionamiento del sistema propuesto. En la cuarta sección se muestran los resultados obtenidos durante la fase experimental mediante tablas y figuras. La última sección consta de la interpretación de resultados, conclusiones y el trabajo que se planea realizar a futuro.

2. Métodos.

En el presente trabajo se propone una metodología de inmersión-emersión (SIE) fundamentada en el sistema de lastre de los submarinos. En dicho sistema se varía la masa mediante el llenado o vaciado del agua en las cámaras de lastre aumentando el peso, con la finalidad de manipular los movimientos de inmersión-emersión.

El tamaño del casco y las cámaras de lastre se diseñaron con las medidas propuestas en la fig. 1, donde se muestra el isométrico del casco y las cuatro cámaras de lastre con sus respectivas medidas.

La presión total que ejerce el agua (fuerza de flotación $F_{flotabilidad}$) al casco del AUV sumergido se ha obtenido mediante la sumatoria de la fuerza de empuje E y la presión hidrostática P_H .

$$F_{flotabilidad} = E + (-P_H) \quad (1)$$

Las vistas frontal, lateral y aérea del casco se muestran en la fig.2.

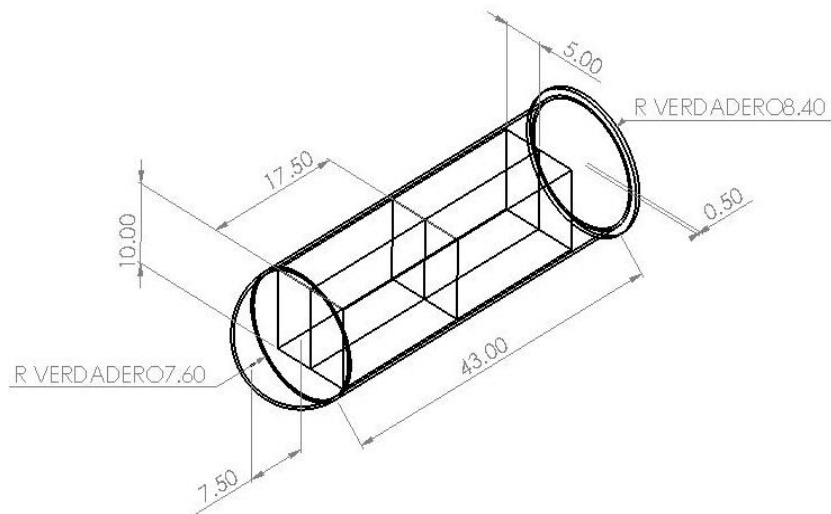


Figura 1. Isométrico de cámara de lastre y casco del AUV (las dimensiones están dadas en centímetros por el Sistema Internacional de Unidades).

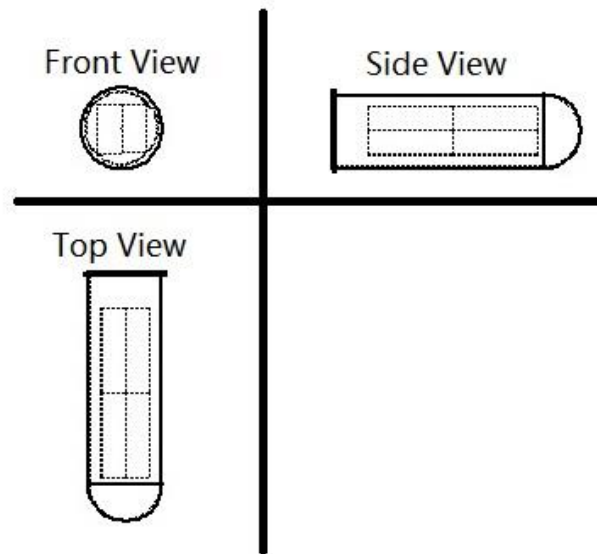


Figura 2. Vistas del casco.

El diseño texturizado fue realizado en un software CAD el cual se muestra en la fig.3, este sirvió como guía principal para la implementación física del prototipo implementar físicamente el prototipo.

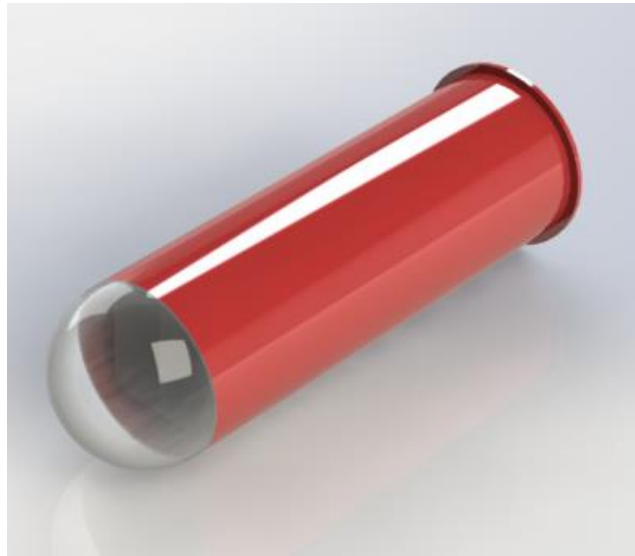


Figura 3. Diseño del casco.

La presión hidrostática se define por la expresión

$$P_h = (\delta * g * h) \quad (2)$$

Donde $\delta = 997 \text{ Kg/m}^3$ densidad del agua, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ constante de aceleración de la gravedad y h la profundidad de trabajo. Sustituyendo los valores con una profundidad de 1.7m (alberca de pruebas) se obtuvo la presión que recibe el casco 16610.02 N/m^2 .

De acuerdo al principio de Arquímedes se establece que, “Todo cuerpo sumergido en un fluido recibe un empuje ascendente igual al peso del fluido desalojado” (H. Pérez 2014). Esta fuerza recibe el nombre de empuje.

$$E = m \cdot g = (\delta \cdot g \cdot v) \quad (3)$$

donde $m = 6.99 \text{ kg}$ es la masa del casco.

El volumen (v) del fluido desplazado es equivalente al volumen del casco (v_T). El v_T se ha calculado con:

$$\sum (v_1, v_2, \dots, v_n) = v_T \quad (4)$$

Siendo $v_1 = 0.007803 \text{ m}^3$ el volumen del cilindro.

$$v_1 = (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad (5)$$

El v_2 corresponde al volumen de la semi esfera 0.0009194 m^3 calculado con la expresión.

$$v_2 = \frac{2}{3} \pi \cdot r^3 \quad (6)$$

Realizando la sumatoria de v_1 y v_2 se obtuvo que $v_T = 0.008722 \text{ m}^3$.

De acuerdo al principio de Arquímedes la fuerza de empuje (E) ascendente que recibe el casco es igual a 85 N .

En la fig. 4 se muestran las fuerzas que afectan al casco sumergido en el agua.

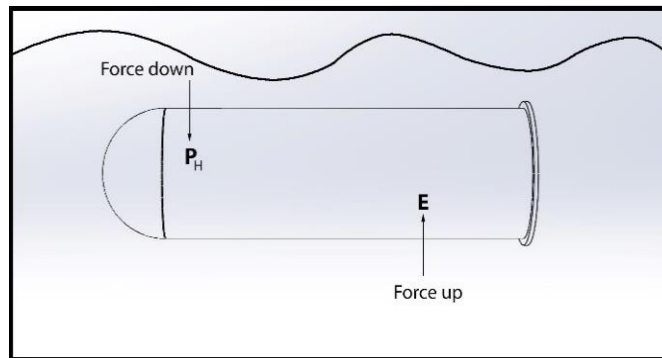


Figura 4. Representación de las fuerzas que intervienen en el casco.

La posición del centro de flotabilidad y gravedad se ubica en el origen (0,0,0), el cual se utiliza como referencia para controlar los movimientos longitudinales (x) y transversales (y) dentro de los intervalos que se presentan en la tabla I, los ejes y ángulos de rotación se muestran en el diagrama de cuerpo libre en la fig.5.

Tabla 1. Intervalos de control.

Eje	Movimiento	Valor inferior	Valor superior
x	longitudinal	-5°	5°
y	transversal	-5°	5°

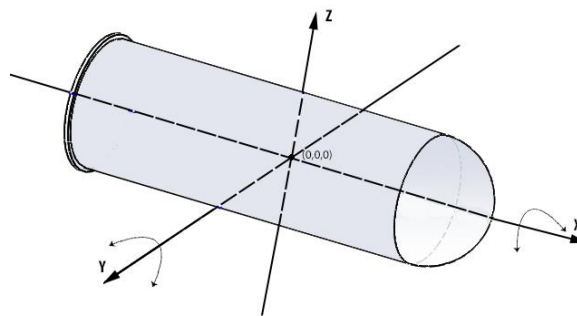


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre.

De acuerdo a las recomendaciones presentadas en (H. A. Moreno, 2014) los factores que se deben considerar para el diseño del casco son: la profundidad de operación (la presión hidrostática que soportará), los niveles de temperatura, resistencia a la corrosión, volumen de los elementos internos, facilidad para ensamblar/desensamblar, factibilidad de construcción, considerar las fuerzas de arrastre que se generan por movimientos y costo de materiales. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot. Cuando el robot se mueve a velocidad constante, la fuerza generada por el impulsor es igual a las fuerzas de arrastre. Por lo tanto, a menores fuerzas de arrastre menor es la energía consumida durante la navegación del AUV. Las fuerzas de arrastre dependen en gran medida de la geometría del casco.

Para el diseño del AUV se recomienda una cabina con forma cilíndrica. Esto se debe a que (para un determinado volumen) las fuerzas de arrastre que se generan son pequeñas cuando se comparan con otras geometrías. Por otro lado, esta forma geométrica es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades (C. T. Ross, 2005). Además, la manufactura de una cabina con esta geometría es relativamente simple y esto a su vez tiene consecuencias favorables en el costo.

En este caso el casco se armó con policloruro de vinilo (PVC) debido a sus características termoplásticas, cabe mencionar que este material no se oxida ni se corroe.

El diseño estructural del SIE está conformado por 4 cámaras de lastre, las cuales contienen una bomba para llenado (b_1, b_2, b_3, b_4) y una bomba para vaciado (b_5, b_6, b_7, b_8) del agua fig.6. El sistema se alimentó con una fuente de voltaje de 11.1 v a 2.2 A de Polímero de Litio (LiPO).

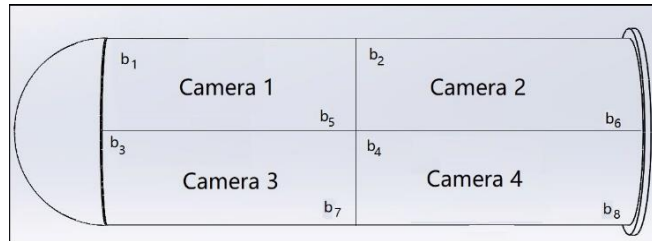


Figura 6. Diseño estructural del casco del AUV.

Basados en la expresión para el cálculo del volumen de un prisma rectangular.

$$v = A_b \cdot h \quad (7)$$

$$v = (a \cdot b) \cdot h \quad (8)$$

Se calculó el volumen de cada una de las cámaras siendo a y b los lados de la base y (h) la altura.

Al sustituir los valores correspondientes se obtuvo que el volumen de cada una de las cámaras de lastre es de 0.000875 m^3 teniendo como capacidad de almacenamiento de 0.875 lts obteniendo 3.5 kg por todas las cámaras.

El algoritmo de control retroalimentado del SIE está representado mediante un diagrama de rutinas secuenciales fig. 7. El algoritmo comienza recibiendo una señal a la cual es comparada, si la señal es igual a \mathbf{i} (inmersión), se activan al mismo tiempo las bombas de llenado (b_1, b_2, b_3, b_4), este proceso tiene una duración de diez segundos (tiempo necesario para que el casco este sumergido completamente gracias al aumento de su masa), al término de este tiempo las bombas son apagadas para dar inicio al sistema de estabilización.

El sistema de estabilización trabaja con la información proporcionada por el giroscopio. Su trabajo consiste en verificar que los ángulos de inclinación estén dentro de los intervalos ($-5^\circ > x < 5^\circ$) y ($-5^\circ > y < 5^\circ$) correspondientes a los movimientos longitudinales (x) y transversales (y). Cuando el ángulo longitudinal sea mayor a -5° se activan las bombas b_1 y b_2 , en caso contrario se activan b_3 y b_4 . Para los movimientos transversales si el ángulo de inclinación es mayor a -5° se activan las bombas b_1 y b_3 , en caso contrario se activan b_2 y b_4 .

Una vez terminadas las comparaciones, el lazo de retroalimentación vuelve a verificar la señal de entrada a . Si a es distinta de \mathbf{i} , se inicia el proceso de emersión, en el cual se activan las bombas de vaciado (b_5, b_6, b_7, b_8) durante 10 segundos (tiempo requerido para expulsar el agua introducida durante el proceso de inmersión) para reducir su masa, lográndose la emersión del casco.

Al terminar los diez segundos, inicia el sistema de estabilización, el cual verifica la condición: cuando el ángulo longitudinal esta fuera de los rangos establecidos, activa b_7 y b_8 , en caso contrario activa b_5 y b_6 . Para el caso de los movimientos transversales se activan (b_6 y b_8) o (b_5 y b_7) según sea el caso.

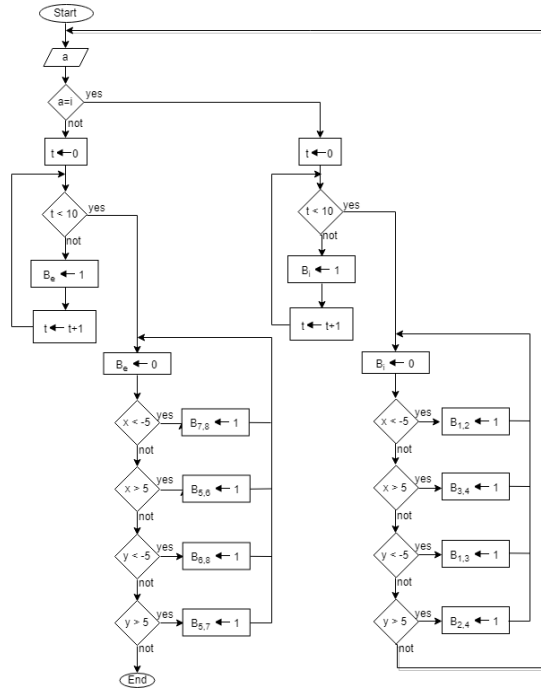


Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo de control retroalimentado.

Descripción de experimentos.

El prototipo de SIE y estabilización se construyó dentro del laboratorio de Sistemas Robóticos (SIRO) de la FCC-BUAP. Se inicio por el armado y sellado de las cámaras de lastre, posteriormente se adaptaron las bombas de llenado y vaciado en cada una de las cámaras, se realizaron los cortes de PVC con las medidas establecidas para el casco y por último, se realizó la adaptación de cámaras y giroscopio dentro del casco del AUV.

Los experimentos que a continuación se describen fueron realizados en un ambiente controlado (alberca con 1.7m de profundidad y temperatura ambiente).

En el primer experimento se verificó el sellado de las cámaras de lastre y casco. El segundo experimento consistió en colocar el prototipo en estado de flotación para verificar su estabilidad. Se provocaron los movimientos longitudinales y transversales, para corroborar el funcionamiento del sistema de estabilización de lazo cerrado. El tercer experimento consistió en la inmersión y emersión del casco, mediante la señal i . Donde se ha tomado en consideración el tiempo y la masa. En el cuarto experimento se comprobó el principio de Arquímedes ejecutando el proceso de inmersión variando el peso del casco. El quinto experimento consistió en activar el SIE y el sistema de estabilidad como se muestra en el diagrama de flujo fig. 8.

3. Resultados.

El primer experimento consto de seis eventos, en los cuales se observaron filtraciones en las uniones de la cámara de lastre y el casco, las cuales se corrigieron paulatinamente, hasta lograr el aislamiento total del casco.

El segundo experimento consto de tres eventos, donde se observó que en los primeros dos, la distribución de los elementos no permitía mantener el centro de masa de acuerdo al diseño realizado en software, por lo que se realizaron algunas modificaciones de distribución de espacios. En el último evento se observó que el sistema de estabilización trabajó según las condiciones dadas en la tabla I, se verificó la activación correcta de las bombas cuando el giroscopio detectó inclinaciones fuera del rango. La activación de las bombas se registró en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2. Activación de bombas i-e.

Acción	Bomba	Estado
Inmersión	b1, b2, b3, b4	1
	b5, b6, b7, b8	0
Emersión	b1, b2, b3, b4	0
	b5, b6, b7, b8	1

Tabla 3. Estado de las bombas acción de inmersión.

Movimiento	Grados	Bomba	Estado
Longitudinal (x)	x<-5	b1, b2	1
		b3, b4, b5, b6, b7, b8	0
	x>5	b3, b4	1
		b1, b2, b5, b6, b7, b8	0
Transversal (y)	y<-5	b1, b3	1
		b2, b4, b5, b6, b7, b8	0
	y>5	b2, b4	1
		b1, b3, b5, b6, b7, b8	0

Tabla 4. Estado de las bombas acción de emersión.

Movimiento	Grados	Bomba	Estado
Longitudinal (x)	x<-5	b7, b8	1
		b1, b2, b3, b4, b5, b6	0
	x>5	b5, b6	1
		b1, b2, b3, b4, b7, b8	0
Transversal (y)	y<-5	b6, b8	1
		b1, b2, b3, b4, b5, b7	0
	y>5	b5, b7	1
		b1, b2, b3, b4, b6, b8	0

En el tercer experimento se midieron los tiempos de inmersión y emersión, los cuales fueron variando mediante el aumento de la masa del tanque. El tiempo de inmersión con la masa mínima de 8.69kg fue de 17s y con la máxima de 10.39kg fue de 5s ya que a mayor masa menor tiempo de inmersión como se muestra en fig. 8, en caso contrario para el proceso de emersión se obtuvo un tiempo máximo de 15s y un tiempo mínimo de 5 s fig. 9.

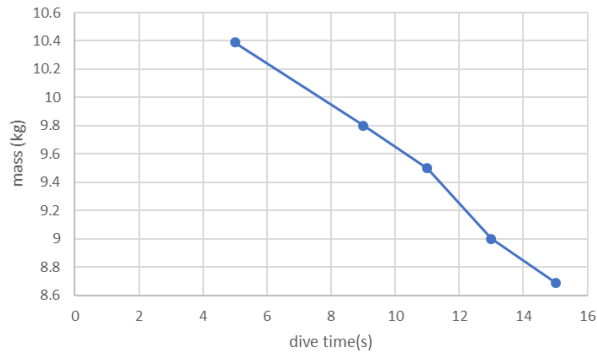


Figura 8. Tiempo de inmersión contra masa.

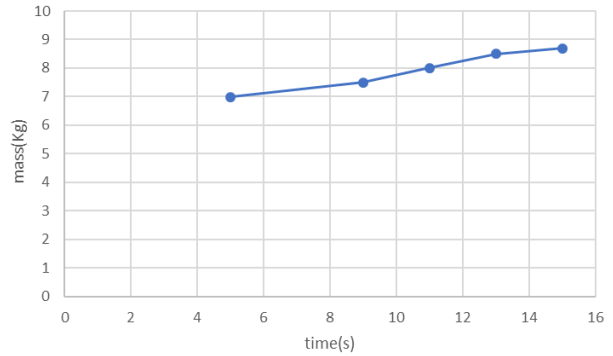


Figura 9. Tiempo de emersión contra masa.

En el cuarto experimento se realizaron tres eventos, en el primero se tomó en cuenta el peso inicial del casco **68.502 N** calculado con:

$$w = m \cdot g \tag{9}$$

Teniendo como resultado que el casco flota en su totalidad, en el segundo evento, se igualó el peso con la fuerza de empuje mediante el aumento de la masa, dando como resultado la inmersión parcial del casco. En el último evento, se aumentó la masa del casco a **8.69 Kg** observándose la inmersión total.

El quinto experimento constó de ejecutar el sistema completo (SIE y estabilidad), donde se observó que el casco descendió y ascendió con diferentes velocidades en función de la masa como se muestra en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Velocidad de inmersión.

Tiempo(s)	masa (kg)	velocidad(cm/s)
5	10.39	34.00
9	9.8	18.89
11	9.5	15.45
13	9	13.08
15	8.69	11.33

Tabla 6. Velocidad emersión.

Tiempo(s)	masa (kg)	velocidad(cm/s)
15	8.69	11.33
13	8.5	13.08
11	8	15.45
9	7.5	18.89
5	6.99	34.00

Conclusiones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los cinco experimentos se demostró que en la implementación del proyecto se presentaron problemas que no fueron tomados en cuenta durante la etapa de diseño, como el sellado, distribución de componentes y consumo de la batería.

De acuerdo a las gráficas obtenidas en fig. 7 y 8 y las tablas 4 y 5 se observó que a mayor masa la velocidad de inmersión es mayor y a menor masa la velocidad de emersión es mayor.

De acuerdo al cálculo de la presión hidrostática se concluye que el prototipo es capaz de soportar **98000 N/m²** lo cual le permite descender a una profundidad máxima de 10 m, debió al área donde se realizaron las pruebas solo se pudieron corroborar nuestros cálculos hasta una profundidad máxima de 1.7 m.

Debido a los resultados obtenidos se comprobó que el sistema propuesto es una opción viable para resolver el problema de estabilidad, inmersión-emersión de un AUV. También se comprobó que el SIE funciona de manera similar a los trabajos referenciados en la parte II.

Como trabajo futuro se buscará optimizar el rendimiento de la batería, modelar matemáticamente el sistema en función de las variables internas y externas, con la finalidad de obtener mejores tiempos de reacción y disminuir errores en ambientes no controlados, utilizando técnicas de simulación y agregar un sistema que permita manipular la profundidad en la que se desplaza el AUV.

Agradecimientos.

Agradecemos a los integrantes del laboratorio SIRO (alumnos y profesores), que han brindado sus conocimientos, habilidades y experiencias directa e indirectamente durante el desarrollo de este proyecto. A la facultad de Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Referencias Bibliográficas.

- A. Agrawal, B. Prasad, V. Viswanathan, and S. K. Panda, (2014).** *Dynamic Modeling of Variable Ballast Tank For Spherical Underwater Robot*. IEEE J. Ocean. Eng., vol. 40, no. 2, 2014, ISBN 978-1-4673-4569-9, DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505648.
- A. Bi and Z. Feng, (2018).** *Hierarchical Control of Underwater Vehicle Variable Ballast Systems*. IEEE Xplore Date of Conference: 25-27 July 2018, Wuhan, China, ISBN 978-988-15639-5-8, DOI: 10.23919/ChiCC.2018.8482802.
- C. T. Ross, (2005).** *A conceptual design of an underwater vehicle*. ELSEVIER Ocean Engineering, vol. 33, Issue 16, November 2006, Pages 2087-2104, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.005>.
- G. Antonelli, D. Yoerger and T. I. Fossen, (2008).** *Underwater Robotics*. Springer Handbook of Robotics (pp.987-1008), January 2008, ISBN 978-3-540-23957-4, DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_44.
- G Antonelli and S. Chiaverini, (2006).** *Kinematic Control of Platoons of Autonomous Vehicles*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 6, pp.1286-1287, December 2006, ISSN 1941-0468, DOI: 10.1109/TRO.2006.886272
- G. Antonelli, S. Chiaverini and N. Sarkar, (2001).** *Adaptive control of an autonomous underwater vehicle experimental results on ODIN*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 9, no 5, September pp.756-765, 2001, ISSN 1558-0865, DOI: 10.1109/87.944470.
- H. A. Moreno, R. Saltarén, L. Puglisi, I. Carrera, P. Cárdenas and C. Álvarez, (2014).** *Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 3-19, ene. 2014, ISSN 1697-7920, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.001>.
- H. Mohiuddin, S. Morsalin and K. Mahmud, (2014).** *Design and fabrication of a prototype submarine using Archimedes principle*. IEEE Xplore Date of Conference: 23-24 May 2014, Dhaka, Bangladesh, ISBN 978-1-4799-5180-2, DOI: 10.1109/ICIEV.2014.6850769.
- H. Pérez, (2014).** *Principio de Arquímedes y flotación de los cuerpos*. México: Grupo editorial patria (2014).
- J. Szymborski, (2002).** *Lead-acid batteries for use in submarine applications*. IEEE Conference: 21-21 June 2002, San Antonio, TX, USA, ISBN 0-7803-7572-6, DOI: 10.1109/AUV.2002.1177196.
- O. Gherairi, M. B. Hamed and R. Boucetta, (2017).** *Dynamic model of underwater vehicle*. IEEE 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 23-25 March 2017, Hammamet, Tunisia, ISBN 978-1-5090-6287-4, DOI: 10.1109/GECS.2017.8066192.

S. A. Woods, R. J. Bauer, and M. L. Seto, (2012). *Automated Ballast Tank Control System for Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 37, no. 4, october 2012, ISSN 1558-1691, DOI: 10.1109/JOE.2012.2205313.

T. Wang, X. Ye, L. Wang and Chao Zhang, (2011). *Hydrodynamic Analysis and Optimization for Dish Shaped Underwater Robot*. Proceedings of the 2011 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation: August 7 - 10, Beijing, China, ISSN 2152-744X, DOI: 10.1109/ICMA.2011.5985782.

X. lin, S. Guo, Y. Hao, X. Ye, C. Qiu and J. Du, (2009). *A Simplified Dynamic Modeling of a Spherical Underwater Vehicle*. Proceedings of IEEE International conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, February 21-26 2009, ISBN 978-1-4244-2678-2, DOI: 10.1109/ROBIO.2009.4913161.

Z. Liu, S. Guo, H. Li and X. Lin, (2011). *An Improved 3D Modeling of Water-jet Propellers for a Spherical Underwater Robot*. Proceedings of the 2011 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation: August 7 - 10, Beijing, China, ISSN 2152-744X, DOI: 10.1109/ICMA.2011.5985677.

Información de los autores.



José Luis Hernández Amecca. Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico de Puebla en 2001. En 2005 recibió el título de Maestro en Ciencias de la Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). En 2017 obtuvo el título de Doctor en Planificación Estratégica y Gestión de la Tecnología de la Universidad Popular Autónoma de Puebla (UPAEP). De 2002 a 2004 trabajó como Ingeniero en el departamento de implementación de proyectos de la empresa digital IUSACEL. Trabaja como Profesor en la facultad de Ciencias de Computación de la BUAP desde 2007, donde su línea de investigación es la robótica y aprendizaje.



Enrique Cortés Rodríguez, estudiante de la carrera de Ingeniería en Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Actualmente se encuentra realizando su tesis en el laboratorio (SIRO). Ha participado con exposición de carteles y conferencias en los congresos: IX Congreso Nacional de Tecnología Aplicada a Ciencias de la Salud (CONTACS), Congreso Nacional de Ciencias de la Computación (CONACIC), VII Congreso Nacional de Tecnologías en la Educación (CONTE). Durante su colaboración en dicho laboratorio ha participado en el concurso "COCOTRON" obteniendo el primer lugar. Participó como miembro del Comité Organizador del VII Torneo Nacional de Robótica "GUERRA DE DIOSES". Por último, ha sido miembro del Comité Organizador del pasado evento "NOCHE DE LAS ESTRELLAS SEDE BUAP 2019".



Dra. Elsa Chavira Martínez, Licenciatura en Física, BUAP, la Maestría en Ciencias en Física del Estado Sólido en el Instituto de Física, BUAP y obtuvo en grado de Doctora en Ingeniería Biomédica UAPEP, Posgrado de Excelencia PNP, CONACYT. Como científica e investigadora ha trabajado en: Física de Superficies, Materiales Semiconductores, es especialista en el crecimiento de Silicio monocristalino por la técnica Czochralski, en el campo de la Microelectrónica, ha diseñado diversos Circuitos Integrados de Aplicación Específica. Actualmente está adscrita a la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) en la BUAP, como Profesora - Investigadora Titular A Tiempo Completo.



Luis Enrique Colmenares Guillén, realizó sus estudios de la Licenciatura en Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). La Maestría en la Universidad de las Américas Puebla. El doctorado fue realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña de Barcelona España. Actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP. Pertenece a un cuerpo académico Prodep. Es miembro del Registro Conacyt de Evaluadores Acreditados (RCEA). Pertenece a dos redes temáticas Conacyt. Pertenece al padrón de Investigadores y de Consultores de la BUAP. Actualmente tiene publicaciones nacionales e Internacionales, además tiene cuatro patentes registradas y dos títulos de patente. En la Facultad de Ciencias de la Computación ha impartido las cátedras de Sistemas Operativos, Administración de proyectos, Sistemas Distribuidos, Procesamiento Digital de imágenes, Sistemas de tiempo real. Actualmente ha desarrollado algoritmos y sistemas clasificadores para el área de la Inteligencia artificial y reconocimiento de patrones.