

Diseño y Validación de un Robot Marino no Tripulado para Monitoreo Ambiental Recurrente de Operaciones Mineras en el Mar

Francisco Cuellar ¹

¹ Tumi Robotics, Av. Buena Vista Nro. 540 Int. 301, San Borja, Lima, Perú (cuellar.ff@gmail.com)

RESUMEN

Según el Foro Mundial Marítimo, en los últimos años es de gran preocupación el impacto de las actividades industriales cerca del mar y la disponibilidad de datos e información que permitan realizar las actividades económicas de forma sostenible. El Perú ha aprobado la Política Nacional Marítima 2019-2030 de carácter multisectorial a través del Decreto Supremo N° 012-2019-DE cuya misión involucra el articular políticas sectoriales y promover el uso eficiente y aprovechamiento sostenible del mar peruano. En contraste a esta visión, se ha identificado como problema principal la escasa información de parámetros oceanográficas y ambientales que permitan realizar una observación sistemática de las operaciones mineras en el mar peruano. Algunas de las causas es que los métodos tradicionales de monitoreo ambiental recurrente y de gran resolución espacial tienen un alto costo económico, de recursos humanos y de tiempo. Es por ello por lo que se propone un robot marino no tripulado o ASV (Autonomous Surface Vehicle) para monitoreo ambiental recurrente de las operaciones mineras de Antamina en el mar

de Huarmey – Ancash. El vehículo puede operar de forma teleoperada o autónoma mediante GPS, se encuentra equipado con propulsores fuera de borda que permiten la navegación en mar abierto, y un sistema de suspensión para la nivelación de la plataforma principal. La solución le permite a la empresa minera realizar operaciones de monitoreo de forma remota, sin el uso de combustible, sin poder en riesgo la vida de las personas, y recolectar gran cantidad de datos de forma recurrente. Las funciones del vehículo marino no tripulado son: monitoreo de infraestructura marina, monitoreo ambiental de calidad de agua y fondo marino, y caracterización hidrográfica del entorno de operación. Para ello el robot cuenta con: Un vehículo submarino teleoperado (ROV) para visualización de fondo marino en tiempo real, una sonda multiparámetro con sensores de acidez, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, turbidez, clorofila y fitoplancton, una estación meteorológica para medir velocidad y dirección de

viento, temperatura superficial, lluvia, humedad, intensidad luminosa y radiación ultra violeta, una ecosonda ADCP para identificar velocidad de corrientes a lo largo de la columna de agua, una roseta de botellas Niskin para toma de muestras de agua, una draga Van Veen para toma de muestras de sedimento marino y una ecosonda de batimetría.

Se muestran cálculos realizados para validar las características de diseño de los cascos que aseguran una adecuada flotabilidad, simulaciones para validar la navegación del ASV y resultados de la implementación con pruebas en ambiente controlado.

1. Introducción

El océano es el ecosistema más grande del planeta, que regula el cambio y la variabilidad en el sistema climático y apoya la economía global, la nutrición, la salud, el suministro de agua y la energía. Según la Primera Evaluación Mundial de los Océanos [1], nuestra civilización se está quedando sin tiempo para evitar el ciclo perjudicial de deterioro de la salud de los océanos que tendría repercusiones dramáticas en la capacidad del océano para proporcionar recursos de manera sostenible. Para lograr la sostenibilidad global y la administración adecuada de los océanos, como se pide en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, la ciencia oceánica es crucial para comprender y monitorear el océano, predecir su estado de salud y apoyar la toma de decisiones para lograr el Objetivo de Desarrollo Sostenible 14 (ODS 14) [2]. El análisis de la calidad y el comportamiento del mar frente a las actividades industriales cercanas es un factor importante para un ecosistema marítimo adecuado, así como también el efecto que tienen para las actividades industriales sostenibles o responsables. El “Instituto de Mar del Perú” (IMARPE) ha desarrollado procesos de análisis de la calidad del agua de mar en diversas zonas del Perú [3] [4], destacando la medición de parámetros como pH, turbidez, salinidad, conductividad, temperatura, nitrato, clorofila, fitoplancton, profundidad y velocidad de la corriente, donde estos parámetros en conjunto otorgan información como el nivel de acidez, la densidad del

agua de mar que influyen en la distribución y concentración de especies marinas y para obtener información de biomasa. Osinergim realiza de forma periódica informes de monitoreo ambiental referido a la calidad de agua superficial y subterránea en diferentes zonas del país, teniendo como objetivo la verificación del cumplimiento y control de la calidad de agua. Estos informes permiten conocer información de cómo se encuentra la calidad de agua en zonas de actividades industriales y si se encuentran en buen estado hidrográfico mediante diversas técnicas y métodos de análisis, en las cuales se enfoca en mediciones de parámetros en campo (pH, temperatura, conductividad eléctrica, caudal, oxígeno disuelto) y en laboratorio (STS, Pb, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Cr, Ni) [4]. Diversas empresas mineras realizan actividades de gestión de agua ya que es un recurso esencial para la población y la sostenibilidad de la industria. Realizan también manejo de residuos sólidos, relaves mineros y monitoreo de biodiversidad. [5]

La revisión de la literatura muestra una variedad de investigaciones de plataformas robóticas marítimas para realizar el monitoreo del mar a través de la integración de vehículos y sensores marítimos. En Noruega, se propone una plataforma flotante de inspección de granjas marinas [5] equipada con un ROV para despliegue y análisis a mayor profundidad. En [6] implementa HydroNet, un ASV de tamaño pequeño diseñado para monitorear la calidad del agua costera con la capacidad de medir concentraciones de hidrocarburos y metales pesados. En [7] implementa un vehículo de superficie no tripulado (USV) equipado con un sensor de agua multiparámetro. También se desarrollan soluciones comercialmente disponibles enfocadas en un diseño ASV y equipos de sensores. El ME120 [8] de Ocean Alpha desarrolla un catamarán USV equipado con una ecosonda, un sensor ADCP y una sonda de calidad del agua.

La empresa Subsea Tech desarrolla el CAT-Surveyor [9] para la adquisición de datos hidrográficos o vigilancia de hábitats submarinos en puertos, zonas costeras y aguas interiores. La empresa Marine Advanced Robotics Inc. desarrolla el WAMV [10] que cuenta con una tecnología de estructura flexible y adaptable a la superficie y en la que se han realizado investigadores para aplicaciones de navegación autónoma.

Por lo tanto, se propone el diseño de un vehículo marino que realice el monitoreo oceanográfico mediante la recopilación de datos para actividades mineras en la costa de Huarmey. Este sistema integra una sonda multiparamétrica que permite medir parámetros de calidad del agua de mar como pH, turbidez, salinidad, conductividad, temperatura,

nitrateo, clorofila y fitoplancton; una ecosonda ADCP para obtener la velocidad a través de la columna de agua, estación meteorológica para medir parámetros del medio ambiente, una draga Van Veen para la captura de sedimentos, botella Niskin para la toma de muestras de agua y una ecosonda batimétrica, en conjunto con un GPS para obtener la profundidad del mar. El ASV tiene un diseño robusto que le permite adaptarse al movimiento de las olas y mantener un correcto equilibrio; El vehículo está controlado por un sistema de control autónomo con controlador basado en linealización por realimentación, por lo que es capaz de realizar tareas de navegación programadas.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: La Sección II presenta el diseño mecatrónico para las condiciones del océano y la matriz de despliegue de sensores propuesta para el ASV. La Sección III se enfoca en el desarrollo de un sistema de control autónomo del ASV basado en su modelo cinemático y dinámico usando una técnica de control no lineal. La Sección IV presenta las simulaciones de la estrategia de control para el ASV y la validación del algoritmo de control propuesto. Finalmente, la Sección V muestra la implementación del vehículo marino y sus pruebas en ambiente real.

2. Diseño y Desarrollo del ASV

El principal objetivo de diseño de todo el sistema es obtener un vehículo autónomo para monitorear los parámetros oceanográfico y meteorológicos en las áreas costeras de la bahía. Para lograr este objetivo, el diseño considera las condiciones ambientales y el estado del arte del ASV+ROV. Con base en estos requisitos, el diseño final de la plataforma ASV se presenta en la Fig. 1 con sus especificaciones principales presentadas en la Tabla I. En los siguientes párrafos, se presenta y analiza una explicación detallada de la estructura ASV.

Estos requisitos se enumeran a continuación.

- La estructura principal del ASV debe ser resistente a la corrosión para evitar daños estructurales causados por los elementos.
- El robot debe ser capaz de navegar en la zona costera del mar donde se producen olas medianas.
- Los componentes electrónicos deben estar protegidos dentro de una caja con una clasificación mínima de IP67 según la norma IEC 6052.

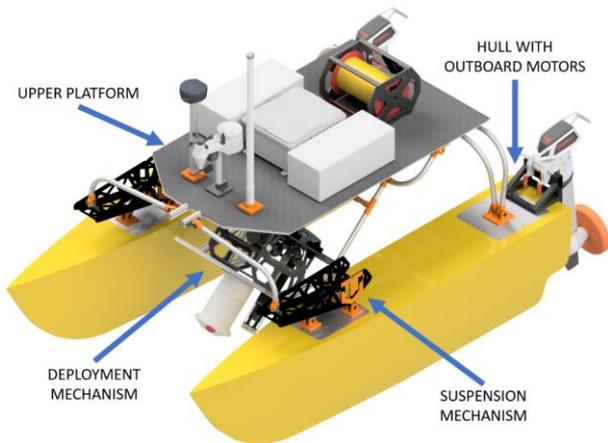


Fig. 1: Modelo CAD del Diseño del ASV

- La forma y configuración del casco deben asegurar la flotabilidad y estabilidad de todo el sistema.
- El ASV debe tener una velocidad máxima de crucero de 8 nudos.
- Las dimensiones del ASV no deben exceder los 3,0 (L) x 2,0 (An) x 2,0 (Al) m, para facilitar el transporte y el montaje.
- El ASV debe tener una autonomía de al menos 2 horas.
- El alcance máximo de la comunicación inalámbrica debe ser de al menos 0,5 km.
- La plataforma superior debe poder transportar una carga útil de hasta 200 kg.
- La alimentación del sistema debe estar compuesta por baterías recargables, cuyo voltaje debe ser monitoreado.

2.1. Diseño Mecánico

El ASV está compuesto por cuatro (04) módulos como se muestra en la Fig. 1: a) Dos cascos de fibra de vidrio que generan la fuerza de flotación principal y establecen la estabilidad de la embarcación. b) Una plataforma superior compuesta por marcos de

Tabla 1: Especificaciones Generales

ESPECIFICACIÓN	VALORES
Longitud Total	3.0 m
Ancho Total	2.0 m
energía	270Ah Paquete de Batería Litio-Polimero
Tiempo de Vida de Batería	2 h
Carga Útil	200 kg
Material	Fibra de vidrio y aluminio anonizado
Peso	120 kg
Velocidad de Propulsión	8 nudos (4.1 m/s)

aluminio y placas de fibra de carbono que funcionan como soporte estructural para los componentes

electrónicos, baterías y cualquier carga útil adicional. c) Un mecanismo de despliegue del ROV y sensores de parámetros oceanográficos. d) Un mecanismo de suspensión entre los cascos y la plataforma superior para estabilizar el ASV y mejorar la toma de datos.

El módulo principal del ASV son los dos cascos de fibra de vidrio, que deben diseñarse para proporcionar la movilidad, máxima velocidad lineal y carga útil que establecían los requisitos. A continuación, se presenta una explicación detallada de la configuración y el diseño de los cascos, así como del sistema de propulsión.

1) *Configuración de los Cascos*: La estabilidad y maniobrabilidad de un vehículo acuático se ve afectada por la forma y configuración del casco. Según Luhulima et. al [11], los multicascos tienen una excelente estabilidad y comportamiento en la mar, así como características de escora y escora. Teniendo en cuenta esta información y que se han desplegado un ROV y sensores de calidad del agua, se seleccionó una configuración de catamarán para el ASV. Un catamarán consta de dos cascos del mismo tamaño colocados en paralelo, conectados a través de una estructura. Se decidió utilizar tubos de aluminio anodizado para unir ambos cascos. Los tubos están unidos a un marco de aluminio anodizado con placas de fibra de carbono que brindan soporte estructural a la electrónica y sensores debido a su baja densidad y alta resistencia a la corrosión y picaduras.

2) *Diseño de Cascos*: El diseño de cada casco requiere asegurar la flotabilidad de todo el vehículo, para esto, los coeficientes y relaciones del casco se presentan en la Tabla 2 y se explican en [12]. A través del proceso iterativo, se seleccionan dos cascos de fibra de vidrio, por sus propiedades anticorrosivas, con dimensiones finales de 2.7(L)x0.46(W)x0.6(H) m y un peso en el aire de 40 kg. La fuerza de flotabilidad de cada casco se calcula mediante la ecuación (1), lo que da como resultado un valor aproximado de 280 kg.

$$m_{LDC} = C_p \times L_{WL} \times C_m \times B_{WL} \times T_c \times \rho \quad (1)$$

donde C_p es el coeficiente prismático, L_{WL} es la longitud del plano de agua, C_m es el coeficiente de sección central, B_{WL} es el ancho del plano de agua, T_c es la altura sumergida y ρ es la densidad del agua.

3) *Sistema de Propulsión*: El sistema consta de dos motores fuera de borda, uno en cada casco, para proporcionar una configuración de dirección diferencial. La Fig. 2 muestra todas las fuerzas que actúan sobre el catamarán. R_T y F_P son la resistencia

Tabla 2: Coeficientes y Ratios del Casco

RATIO O COEFICIENTE	ECUACIÓN
Relación longitud-viga	L_{WL}/B_{WL}
Relación viga-proyecto	B_{WL}/T_c
Coefficiente de finura del plano de flotación	$A_W/(B_{WL} \times L_{WL})$
Coefficiente de sección central	$A_M/(B_{WL} \times T_c)$

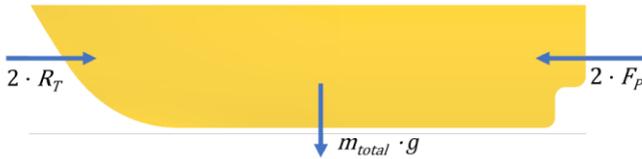


Fig. 2: Diagrama de Cuerpo Libre del ASV

total y la fuerza de propulsión de cada casco respectivamente, y m_{total} es el peso del robot. Para determinar el empuje R_T , se calculó la resistencia del casco de acuerdo con el método recomendado establecido en ITTC-57 [13]. Este valor se obtuvo mediante la ecuación (2), en la que se puede ver la dependencia cuadrática de la velocidad de cruce V , con un valor calculado para el coeficiente de resistencia C_T manteniendo constante la superficie mojada S .

$$R_T = \frac{1}{2} \times C_T \times \rho \times S \times V^2 \quad (2)$$

De la suma de todas las fuerzas en la Fig. 2, se obtiene la ecuación (3).

$$\sum F = -2 \cdot R_T + 2 \cdot F_P = m_{total} \times a \quad (3)$$

Y resolviendo con respecto a la variable F_P , se obtiene la ecuación (4).

$$F_P = \frac{2 \cdot R_T + m_{total}}{2} \quad (4)$$

El valor resultante obtenido para una fuerza de empuje mínima requerida es de aproximadamente 38 kg en cada motor. Así, dos motores comerciales de 52 kg fueron seleccionados.

4) *Mecanismo de Despliegue*: Este mecanismo consta de tubos de aluminio anodizado que conforman el brazo de despliegue, un marco de aluminio anodizado que brinda soporte estructural para el ROV y sensores como se presenta en la Fig. 3, y dos actuadores lineales que están conectados en un extremo del brazo superior. plataforma y el brazo de despliegue en el otro extremo. La Fig. 4 muestra el diagrama de cuerpo libre

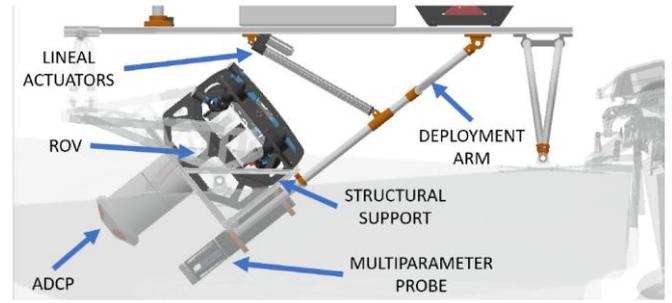


Fig. 3: Mecanismo de Despliegue

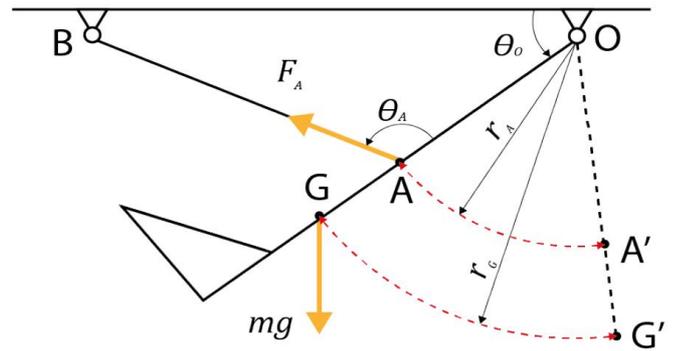


Fig. 4: Diagrama de Cuerpo Libre del Mecanismo de Despliegue

del mecanismo donde F_A es la fuerza aplicada desde los actuadores lineales y $m \cdot g$ es el peso del mecanismo y el equipo oceanográfico.

Para calcular F_A , usamos la ecuación (5) que representa el movimiento de rotación en la unión del brazo de despliegue y la plataforma superior.

$$2 \cdot F_A \cdot \sin(\theta_A) \cdot r_A - m \cdot g \cdot \cos(\theta_O) = m[\alpha(r_G)].r_G + I_G \cdot \alpha \quad (5)$$

Donde I_G es el momento de inercia, α es la aceleración angular, m es la masa del mecanismo de despliegue, r_A y r_G son las longitudes desde el punto O hasta los puntos A y G respectivamente. Por lo tanto, F_A se define por:

$$F_A = \frac{m(\alpha \cdot r_G^2 + g \cdot \cos(\theta_O)) + I_G \cdot \alpha}{2 \cdot \sin(\theta_A) \cdot r_A} \quad (6)$$

5) *Mecanismo de Suspensión*: La función principal de este mecanismo es adaptar el ASV a la forma de la superficie del agua y poder estabilizar la plataforma superior para mejorar la toma de datos oceanográficos. Este mecanismo está compuesto por dos brazos de suspensión formados por placas de aluminio anodizado, suspensiones neumáticas, rotulas y rodamientos. Cada brazo de suspensión está montado sobre cojinetes de bloques de almohada en su casco respectivo y el amortiguador de aire está articulado al brazo de suspensión y al casco. Cada brazo de

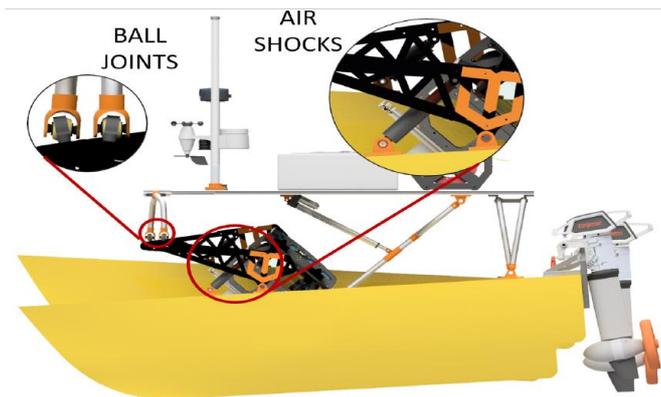


Fig. 5: Mecanismo del ASV – Vista Lateral

suspensión se une a la plataforma superior a través de tubos de aluminio anodizado que contienen en cada extremo una rótula. La Fig. 5 muestra el sistema de suspensión del ASV en diferentes posiciones. Cada casco puede girar hasta $\pm 5^\circ$ con respecto a la plataforma superior.

2.2. Diseño Electrónico

La arquitectura de hardware se divide en subsistemas o módulos como se muestra en la Fig. 6. Esencialmente, el controlador principal adquiere datos de sensores del océano y los transmite a través de una red de área local inalámbrica (WLAN) a una PC de estación remota donde se muestra en una interfaz gráfica de usuario (GUI). En la GUI es posible observar los datos recopilados (video en tiempo real, imagen satelital, nivel de batería, corriente consumida, velocidad, luz de potencia, velocidad de los motores y sentido horario) del ASV y el ROV. Adicionalmente, el ASV utiliza un INS+GPS para obtener su posición y orientación con respecto al plano mundial y una cámara de profundidad para obtener información del entorno por

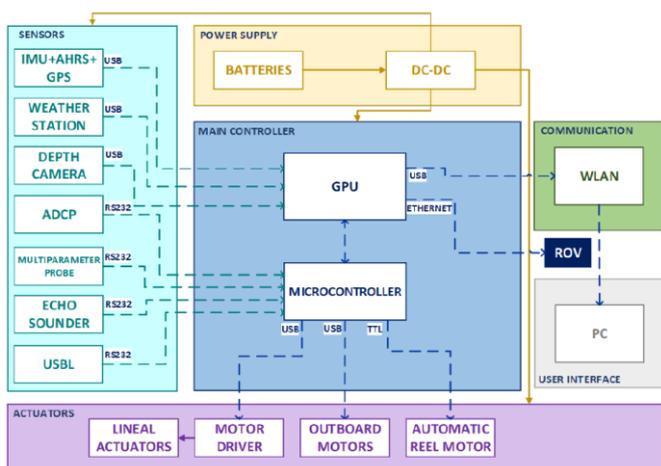


Fig. 6: Diagrama de Bloques del Diseño Electrónico del ASV

donde navega. Del mismo modo, el ROV utiliza una línea de base ultracorta (USBL) para obtener la posición relativa del ROV desde el ASV y un sonar para obtener información sobre el entorno submarino.

Además, los datos de parámetros oceanográficos recogidos por los sensores consisten en un ADCP (velocidad de la corriente), una sonda multiparamétrica (pH, turbidez, salinidad, conductividad, temperatura, nitrato, clorofila, fitoplancton, sulfuros), un batímetro (profundidad del agua) y un estación meteorológica (temperatura ambiental, humedad, velocidad del viento, dirección del viento, lluvia y radiación solar).

El controlador principal está compuesto por un sistema GPU integrado y un microcontrolador ARM. El microcontrolador ARM adquiere los datos del ADCP, la sonda multiparamétrica, la ecosonda y el USBL utilizando el protocolo CAN para poder conectar muchos sensores bajo un bus de comunicación y agregar cualquier otro dispositivo que trabaje en el mismo protocolo. El ARM también controla los actuadores lineales para el mecanismo de despliegue, los motores fuera de borda y el motor del carrito para la comunicación del ROV. La GPU desarrolla un algoritmo de navegación utilizando los datos obtenidos del INS+GPS y la cámara de profundidad, y envía las señales de control al ARM para activar los motores fuera de borda. Además, la GPU transmite los datos, obtenidos de la estación meteorológica, los datos de video y sensores adquiridos del ARM, a la estación remota mediante la conexión inalámbrica.

- Ecosonda ADCP: Se ha propuesto el uso de tecnología de tipo Doppler para medir la velocidad de las corrientes marinas. Esta tecnología parte del principio de la generación de una onda sonora a una determinada frecuencia que se propaga por el agua, rebota en las partículas que contiene y vuelve. Con esto, es posible estimar la distancia de detección de las partículas en el mar y así conocer su velocidad y dirección de movimiento a diferentes niveles de profundidad.
- Sonda Multiparámetro: Es un instrumento que reúne sensores de calidad del agua para medir la temperatura del agua, pH, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, salinidad, sólidos disueltos totales y materia orgánica disuelta coloreada. La sonda simplifica la lectura de los sensores adquiriendo información de todos los parámetros a una frecuencia de muestreo de 1 Hz y enviando los datos juntos en una cadena RS232. Además, el modelo seleccionado incluye un sistema de limpieza central que limpia todos los sensores ópticos.

- Ecosonda de Batimetría: Es un instrumento utilizado en levantamientos hidrográficos que mide la profundidad de un cuerpo de agua. El ASV utiliza una ecosonda de un solo haz capaz de medir profundidades de 0,3 a 100 m, tiene una precisión de 0,01 m y una frecuencia de muestreo de 10 Hz. El sensor se comunica a través de RS232 lo que permite estandarizar el protocolo de comunicación.
- Draga Van Veen: Es un instrumento que permite recoger muestras de sedimento, en agua dulce y salada, de fondos blandos o de dureza media como arena, grava, marga consolidada o arcilla. Consiste en dos cucharas conectadas por una bisagra. Durante el descenso, las dos cucharas se mantienen separadas. Al tocar el fondo se libera el mecanismo de bloqueo y cuando se tira de la línea principal para recuperar la draga, las cucharas se cierran permitiendo la recogida de la muestra.
- Estación Meteorológica: Es un instrumento que tiene integrado un grupo de sensores para la medición de lluvia, viento, temperatura, humedad, presión barométrica y rayos UV, donde la data adquirida es actualizada cada periodo de tiempo de tal forma que brinde información actualizada en todo momento. Este tiene una conexión alámbrica conectada de forma directa al controlador principal.
- Botella Niskin: Permite la toma de muestras de agua a la profundidad deseada. El diseño vertical de la botella facilita el flujo de agua mientras es lanzada. Su interior, libre de cuerpos metálicos, manteniendo las condiciones de la muestra que se puede extraer a través del grifo situado en la parte inferior.

2.2. Interfaz Gráfica de Usuario

El objetivo principal de la interfaz gráfica de usuario es mostrar las mediciones de los sensores y el video del ASV y el ROV en tiempo real. Esto proporciona una retroalimentación visual de los movimientos y la ubicación del ASV para ayudar al usuario a maniobrar correctamente la embarcación. La interfaz de usuario consta de una página web HTML con JavaScript que está alojada en un servidor local creado por el sistema integrado. Un ejemplo de la GUI propuesta se muestra en Fig 7.

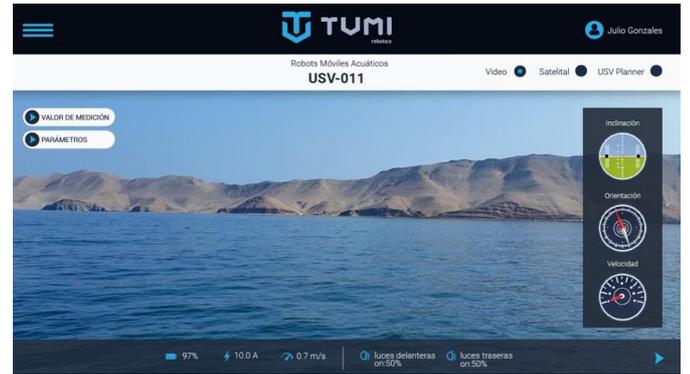


Fig. 7: Interfaz Gráfica del Sistema General

3. Diseño Del Sistema De Control – Differential Flatness

El movimiento del vehículo es plano con movimiento lineal en las direcciones x e y y la rotación alrededor del eje z como muestra la Fig. 8. El modelo cinemático que describe la relación entre las velocidades fijas del cuerpo y fijas de la tierra se expresa como:

$$\dot{\eta} = J(\eta) \cdot v \quad (7)$$

donde $\eta = [x \ y \ \phi]^T$ representa la posición y orientación del vehículo, $v = [u \ v \ r]^T$ representa el aumento velocidad, velocidad de balanceo y tasa de guiñada respectivamente, y $J(\eta)$ es la matriz de rotación alrededor del eje z expresada como:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

El siguiente modelo dinámico se utiliza para desarrollar las ecuaciones de movimiento:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \quad (9)$$

Donde M representa la matriz de masa, $C(v)$ es la matriz de Coriolis, $D(v)$ es la matriz de arrastre y τ es el vector de fuerzas generado por el sistema de propulsión. Integrando (8) con (9) y utilizando las suposiciones presentadas en [14], es posible representar una ecuación de espacio-estado que representa el rendimiento del vehículo como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cdot \cos(\phi) - v \cdot \sin(\phi) \\ u \cdot \sin(\phi) + v \cdot \cos(\phi) \\ r \\ v \cdot r \\ -u \cdot r + \alpha \cdot v \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

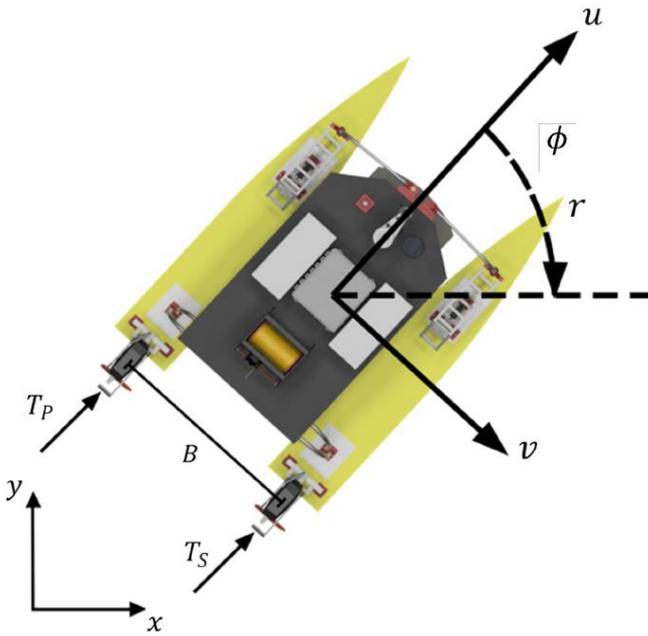


Fig. 8: Sistema de Coordenadas del ASV – Vista Superior

Donde α es un compuesto de las constantes de la matriz dinámica del sistema y m es la masa del ASV

Debido a que los motores fuera de borda están en posición estática en cada casco, lo que genera una configuración diferencial, solo hay dos fuerzas actuando sobre el ASV (fuerzas de empuje y rotacional), por lo que solo se definen dos variables de control τ_u y τ_r . Estas fuerzas son las más relevantes, ya que tienen una relación directa con la configuración del propulsor: a) El movimiento de oleaje se puede generar cuando se aplica una fuerza en la misma dirección para ambos propulsores. b) El movimiento de rotacional se puede generar cuando se aplica una fuerza a los propulsores con direcciones opuestas entre si. En el caso del movimiento de balanceo, no depende de las fuerzas de los propulsores, como se puede ver en la ecuación (9)

El vector de fuerza está directamente relacionado con las fuerzas de los propulsores (T_P y T_S) aplicadas al ASV, siendo babor y estribor respectivamente. El vector fuerza se puede definir mediante las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P + T_S \\ (T_P - T_S) * \frac{B}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Usando la ecuación (11), se pueden calcular T_P y T_S para obtener las señales de entrada para cada propulsor de forma independiente, definidas por:

$$T_P = \frac{\tau_u}{2} + \frac{\tau_r}{B} \quad (12)$$

$$T_S = \frac{\tau_u}{2} - \frac{\tau_r}{B} \quad (13)$$

El sistema en ecuación (10) se puede representar como:

$$\dot{x} = f(\dot{x}) + g.v \quad (14)$$

Un controlador no lineal está diseñado para permitir que el ASV alcance su posición final. Se desarrolla el sistema de control, donde se utiliza un método de "Differential Flatness" para aplicar una linealización de retroalimentación dinámica al modelo ASV mediante la definición de salidas planas y una extensión del sistema mediante el uso de transformación de variables para generar un ley de control efectivo.

Las variables (x, y) se seleccionan como "flat outputs" porque la ruta deseada se puede generar introduciendo solo los valores en los ejes x e y .

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (15)$$

El objetivo del método de "Differential Flatness" es obtener una ecuación de orden de grado relativo que incluya todas las variables de control del sistema. Al diferenciar las salidas "flat" con respecto al tiempo con el sistema (9), se muestra un segundo orden de grado relativo en (16).

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \tau_u \cdot \cos(\phi) + (\alpha \cdot v) \cdot \sin(\phi) \\ \ddot{y} &= \tau_u \cdot \sin(\phi) - (\alpha \cdot v) \cdot \cos(\phi) \end{aligned} \quad (16)$$

Estas ecuaciones solo dependen de una variable de control τ_u y no incluyen τ_r , por lo que el sistema original se extiende. Se agregan dos variables de estado al sistema (10): $z_1 = \tau_u$ y $z_2 = \dot{\tau}_u$, por lo que se obtiene el siguiente sistema extendido:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cdot \cos(\phi) - v \cdot \sin(\phi) \\ u \cdot \sin(\phi) + v \cdot \cos(\phi) \\ r \\ v \cdot r + z_1 \\ -u \cdot r + \alpha \cdot v \\ 0 \\ z_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\tau}_u \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

Derivando las salidas “flat” con respecto al tiempo hasta obtener su orden relativo, se obtiene el siguiente sistema de espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} F_1^{(4)} \\ F_2^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_1 & \Gamma_1 \\ \Psi_2 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{t}_u \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

Se utiliza una ley de control lineal para obtener $F_1^{(4)}$ y $F_2^{(4)}$ que se pueden aplicar a la ecuación (18) para obtener las variables de control del sistema

$$\begin{aligned} F_1^{(4)} &= F_{1d}^{(4)} + p_3 \ddot{e}_1 + p_2 \dot{e}_1 + p_1 e_1 + p_0 e_1 \\ F_2^{(4)} &= F_{2d}^{(4)} + q_3 \ddot{e}_2 + q_2 \dot{e}_2 + q_1 e_2 + q_0 e_2 \end{aligned} \quad (19)$$

donde p_k, q_k son las ganancias del controlador y $e_i^{(k)}$ es el error, con $i = 1, 2$ y $k = 0, 1, 2, 3$.

$$e_i^{(k)} = F_{id}^{(k)} - F_i^{(k)} \quad (20)$$

donde $F_{id}^{(k)}$ son las salidas planas deseadas y sus respectivas derivadas. Las ganancias de control se pueden calcular utilizando cualquier método lineal que minimice los errores.

4. Resultados de Simulación del Sistema de Control

Para validar la estrategia de control propuesta, se generan múltiples caminos con el fin de analizar la respuesta de la estrategia de control para conducir al ASV al camino deseado. Las ganancias de control utilizadas son $p_0 = 3.1623, p_1 = 6.3314, p_2 = 6.1802, p_3 = 3.5157, q_0 = 3.1623, q_1 = 6.3314, q_2 = 6.1802, q_3 = 3.5157$ que han sido calculados mediante una técnica de control lineal.

En las siguientes pruebas, se presentan el seguimiento de la ruta, las variables de estado y las variables de control para observar que el sistema de control propuesto permite que el ASV siga la ruta deseada incluso en presencia de algunas perturbaciones. Para las pruebas, el ASV comienza con las condiciones iniciales $(x_i, y_i, \phi_i, u_i, v_i, r_i) = (0, 1, 0, 0, 0, 0)$

1) Test 1: Trayectoria Circular

En esta prueba, la trayectoria describe un movimiento circular con un radio igual a 10 m como se muestra en la Fig. 9.

2) Test 2: Trayectoria Compleja

En esta prueba, la trayectoria describe un movimiento complejo generado por trayectorias sinusoidales de diferentes frecuencias, como se muestra en la Fig. 10.

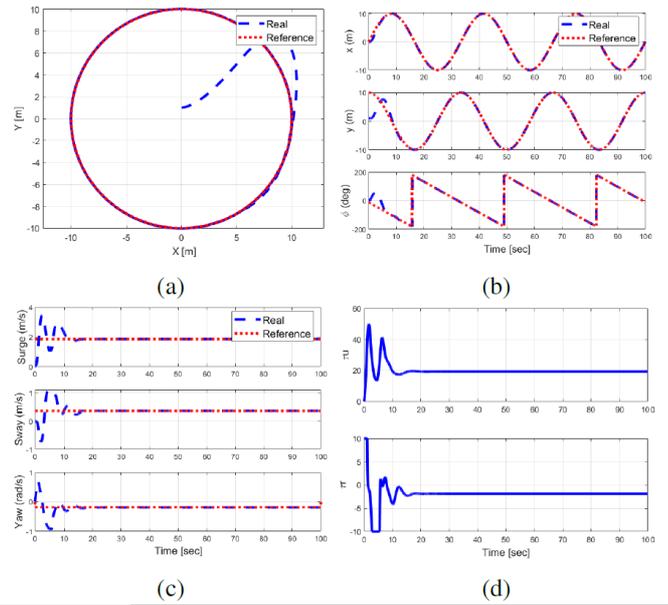


Fig. 9: Seguimiento de Ruta del ASV con Movimiento Circular

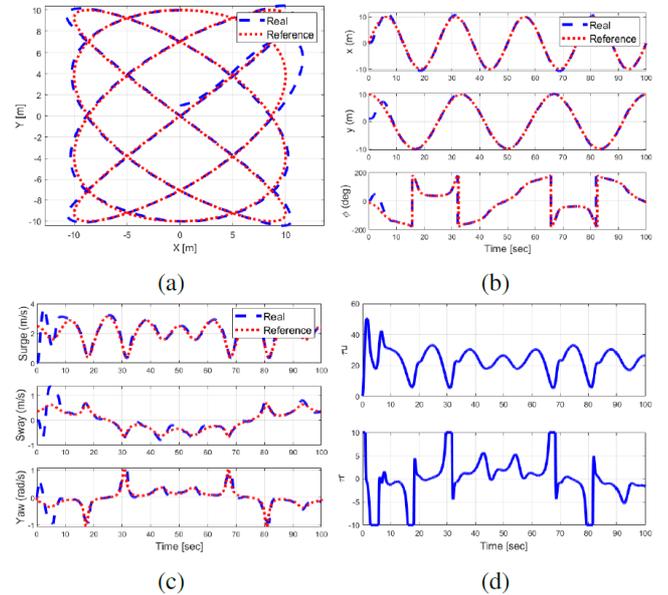


Fig. 10: Seguimiento de Ruta del ASV con Movimiento Complejo

En ambas pruebas simuladas, el ASV sigue correctamente la ruta deseada teniendo un desempeño adecuado en la estabilización para diferentes rutas como se muestra en la Fig. 9a y Fig. 10a, generando las señales de control correctas τ_u y τ_r para cada prueba e incluso cuando se presenta una curva ancha en el camino, el ASV converge nuevamente al camino deseado y continúa con el rendimiento de seguimiento, considerando los parámetros de diseño del ASV.

En la Fig. 9b y la Fig. 10b, se muestra que cualquiera que sea la posición inicial y la orientación, el ASV alcanza la trayectoria deseada de manera óptima y mantiene su trayectoria de seguimiento. Las referencias de x y y tienen una trayectoria sinusoidal

con las mismas frecuencias que representa el movimiento circular de la ASV en el gráfico XY.

En la Fig. 9c y la Fig. 10c, se muestra que todas las velocidades comienzan con una respuesta de sobre impulso, porque los controladores intentan alcanzar la ruta deseada en poco tiempo y luego convergen a su valor de referencia. En la figura 9c el ASV converge a una velocidad constante debido al movimiento circular, pero en la figura 10c las velocidades no son constantes porque la trayectoria tiene muchos cambios de movimiento, por lo que es correcto la respuesta variable de las velocidades, mostrando el correcto desempeño de la técnica de control.

5. Implementación Y Pruebas En Ambiente Real

Luego de haber realizado los cálculos de diseño y su respectivo bosquejo en CAD, se realizó la fabricación e implementación del ASV tal como se muestra en la Fig. 11 y Fig. 12.



Fig. 11: Implementación del ASV – Fase 1



Fig. 12: Implementación del ASV – Fase 2

Se realizaron diversas pruebas con el ASV en un ambiente real en la costa del distrito de Pucusana, dentro de las cuales correspondía diversas características de validación:

- Flotabilidad del ASV con la carga total (electrónica, propulsores, plataforma, sensores y ROV)



Fig. 13: Pruebas del ASV en Ambiente Real

- Impermeabilidad de los cascos
- Funcionamiento del sistema de suspensión
- Comunicación inalámbrica para monitoreo desde una estación remota
- Niveles de velocidad y tiempo de vida de la batería

Para la ejecución de estas pruebas, se contó con una base móvil para el transporte del ASV y poder realizar un adecuado despliegue desde la orilla del muelle, de tal forma que no se generen daños por golpes al ASV.

En la Fig. 13 se muestra el ASV en funcionamiento ya en mar abierto, realizando las diversas tareas de funcionamiento acorde a los requerimientos.

6. Conclusiones

En este documento, presentamos el diseño mecánico y electrónico de un ASV para el monitoreo del océano. Se presentan los cálculos de diseño apropiados para el casco, considerando las fuerzas que se ejercen sobre él, teniendo como principal consideración el peso a soportar que permita al ASV mantener un nivel de inmersión adecuado. Se presenta un mecanismo de despliegue para brindar soporte estructural al ROV y sensores al momento del monitoreo oceánico. El mecanismo de suspensión presentado le otorga al ASV un gran desempeño ante la presencia de las olas durante la navegación.

Se propone un controlador basado en “Differential Flatness” para rastrear el ASV en una ruta deseada con las señales de control correspondientes en el sistema de propulsión eligiendo las salidas planas correctas para aplicar una ley de control lineal directamente y una ecuación de transformación para obtener las variables de control. Los resultados de la simulación presentan el gran desempeño del sistema de control propuesto para llevar el ASV a la ruta deseada

considerando rutas básicas y complejas con una respuesta eficiente.

Se realizó la implementación y validación del ASV mediante pruebas en un ambiente real en el distrito de Pucusana, permitiendo validar su funcionamiento y sistema de control durante su navegación en mar abierto, así como también asegurar la adecuada adquisición de datos de los sensores.

Referencias

- [1] Simcock, A. (2017). World Ocean Assessment. Cambridge University Press.
- [2] Valdes, L. (2017). Global ocean science report: the current status of ocean science around the world.
- [3] IMARPE (2015), QUALITY OF THE MARINE AND COASTAL ENVIRONMENT IN THE ANCASH REGION, 2012, Vol. 42 ISSN 0378-7702
- [4] IMARPE (2008), HUARMEY BAY, ANCASH, PERU. APRIL 2003 ENVIRONMENTAL ASSESSMENT, Vol. 42 ISSN 0378-7702
- [5] Osen, O. L., Leinan, P. M., Blom, M., Bakken, C., Heggen, M., & Zhang, H. (2018, October). A novel sea farm inspection platform for norwegian aquaculture application. In OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston (pp. 1-8). IEEE.
- [6] Ferri, G., Manzi, A., Fornai, F., Ciuchi, F., & Laschi, C. (2014). The HydroNet ASV, a small-sized autonomous catamaran for real-time monitoring of water quality: From design to missions at sea. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 40(3), 710-726.
- [7] Siyang, S., & Kerdcharoen, T. (2016, June). Development of unmanned surface vehicle for smart water quality inspector. In 2016 13th International conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON) (pp. 1-5). IEEE.
- [8] "ME120 - Unmanned Surface Vehicle - OceanAlpha", OceanAlpha, 2020. [Online]. Available: <https://www.oceanalpha.com/product-item/me120/>. [Accessed: 21-Sep-2020].
- [9] Subsea Tech — CAT-Surveyor, 2020. [Online]. Available: <https://www.subsea-tech.com/cat-surveyor/>. [Accessed: 21-Sep-2020]
- [10] Marine Advanced Robotics - WAM-V 16 ASV, 2020. [Online]. Available: <http://www.wam-v.com/wam-v-16-asv>. [Accessed: 21-Sep-2020].
- [11] R. Luhulima, D. Setyawam and I. Utama , "Selecting Monohull, Cata-maran and Trimaran as Suitable Passenger Vessels Based on Stability and Seakeeping Criteria", in 14th International Ship Stability Workshop 29, pp. 262-266, 2014.
- [12] K. Rawson and E. Tupper, Basic Ship Theory, vol. 1. Elsevier Science, 2001.
- [13] H. O. Kristensen and M. Lutzen, "Prediction of resistance and propulsion power of ships," Clean Shipping Currents, vol. 1, no. 6, 2012
- [14] Rigatos, G. G. (2015). Nonlinear control and filtering using differential flatness approaches: applications to electromechanical systems (Vol. 25). Springer.

Perfil profesional

Francisco Fabian Cuellar Córdova: Francisco Cuellar es especialista en políticas y gestión del conocimiento e innovación. Fundador y CEO de Tumi Robotics, profesor asociado del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), y fundador del Grupo de Innovación Tecnológica (GIT – PUCP). Ingeniero Electrónico colegiado, Magíster en Gestión y Política de la Innovación, Magister en Mecatrónica, y candidato a PhD en Ingeniería por la PUCP.

Nombre del autor: Francisco Fabián Cuellar Córdova

Cargo: CEO

Empresa: Tumi Robotics

Correo electrónico: cuellar.ff@tumirobotics.com

Teléfono / Celular: +51 997 528 175

Dirección: Av. Buena Vista Nro. 540 Int. 301, San Borja,
Lima, Perú