



ROBOTICA II

UNIDAD 5. ROBOT SUBMARINOS Y DE SUPERFICIE

Ing. Roberto HAARTH

Ingeniería en Mecatrónica

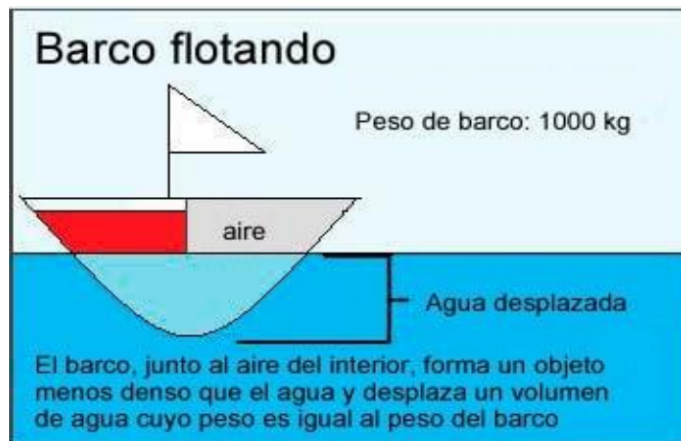
Facultad de Ingeniería. UNCuyo

Mendoza. ARGENTINA. 2023

ROBOTICA MOVIL SUBMARINA y ACUATICA

CONCEPTO Y DEFINICION

Vehículo marino: es capaz de navegar sobre o bajo el agua. Están diseñados para el desplazamiento por las diferentes masas de agua (dulce o salada) que podemos encontrar en el planeta, ríos, lagos y mares. Los vehículos marinos han tenido una gran importancia histórica por el descubrimiento de nuevos territorios y el comercio entre países. En la actualidad siguen siendo de gran importancia, para el transporte transcontinental y para la realización de actividades marinas como la pesca. En Robótica, se abren nuevas posibilidades gracias al desarrollo de los vehículos autónomos, ideales para la exploración, que son capaces de realizar mapas del lecho marino para la instalación y mantenimiento de estructuras submarinas, así como el estudio científico de la composición del agua a diferentes profundidades, o también, en actividades de largo plazo en mantenimiento y exploración del océano. Un dato: El ser humano conoce más del espacio que de las profundidades de los mares y océanos de la Tierra. [4]



VEHÍCULOS MARINOS SOBRE EL AGUA

Los vehículos marinos superficiales son aquellos que se mueven siempre sobre la superficie de agua, es decir, en ningún momento se encuentran totalmente sumergidos. Existe una gran cantidad de vehículos de este tipo, con variados diseños dependientes de su función. Los vehículos marinos a los que más estamos acostumbrados son barcos y naves, pero también existen otros menos convencionales como las motos de agua o hidroaviones. Su diseño depende de la función que vayan a realizar, normalmente la cantidad de personas o carga que vaya a contener. Para el transporte de grandes cargas a largas distancias se crean grandes y alargadas naves como los transatlánticos, para el transporte de personas y pequeñas cargas, por el contrario, se usan barcos más pequeños.

VEHÍCULOS SUBMARINOS

Los vehículos submarinos que pueden moverse, o se mueven exclusivamente, por debajo del agua, es decir, se sumergen por completo dentro del agua. El ejemplo más común de este tipo de vehículos es el submarino, es tan prominente que da nombre al conjunto. Los submarinos son vehículos de gran tamaño capaces de sumergirse a grandes profundidades, gracias a un casco capaz de aguantar la presión, durante largos periodos de tiempo. La potencia para la propulsión se obtiene en grandes submarinos con energía nuclear, aunque submarinos más pequeños utilizan una propulsión diésel-eléctrica. Los submarinos son utilizados sobre todo en actividades militares, tomaron parte en las dos

guerras mundiales, se utilizaron para cruzar áreas de mar controladas gracias a su difícil detección por parte del enemigo. Pero, aparte de los submarinos convencionales tripulados, también existen otros vehículos que son capaces de sumergirse y realizar actividades bajo el agua, estos son los vehículos submarinos autónomos (AUV), y los vehículos submarinos operados de forma remota (ROV). Estos vehículos son muy diferentes a los submarinos comunes ya que, al no necesitar ser controlados por un operario dentro del vehículo, se diseñan con un tamaño mucho menor, lo que permite conseguir una gran maniobrabilidad. Este tipo de vehículos son útiles en la exploración del fondo marino y el mantenimiento de estructuras submarinas, como las dedicadas a la extracción de hidrocarburos.

APLICACIONES DE LOS ROBOTS SUBMARINOS

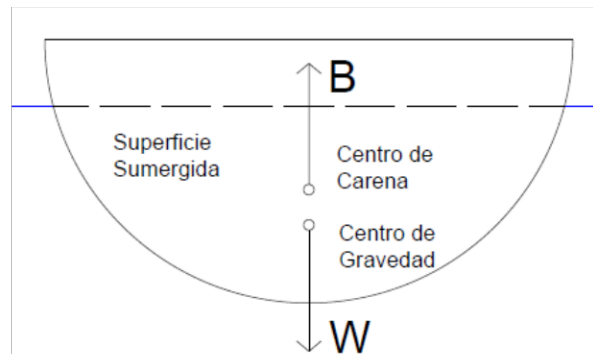
En el pasado reciente la mayoría de los robots submarinos se desarrollaron con el objetivo de realizar trabajos relacionados con dos aplicaciones, el tendido de cables para comunicaciones y las plataformas oceánicas de extracción de petróleo y gas. En la actualidad, sin embargo, existen otras aplicaciones que aprovechan las particulares características de los robots submarinos. Los usos más habituales en la actualidad de los robots submarinos son los siguientes:

- o Investigación oceánica en las ramas de la biología y la geología
- o Arqueología.
- o Aplicación militar, centrada en la vigilancia, localización y neutralización o recuperación de minas y armamento en el fondo marino.
- o Localización y rescate de barcos y aviones hundidos
- o Inspección y reparación de buques
- o Inspección y reparación de construcciones con estructura sumergida (presas, puentes)

FLOTACIÓN

El hecho de que los vehículos marinos estén parcial o totalmente sumergidos en una masa de agua produce una fuerza ascendente que se debe equilibrar con el peso del vehículo para mantener su posición en el eje vertical. A su vez, para favorecer la estabilidad, y para que no se creen momentos no deseados, el centro de gravedad debe situarse en la vertical con el centro de carena (centro geométrico de la parte sumergida del vehículo) y por debajo de este. Esta es la razón por la que los vehículos marinos se diseñan con una gran proporción de la masa en la parte inferior del vehículo, para tener el mayor equilibrio.

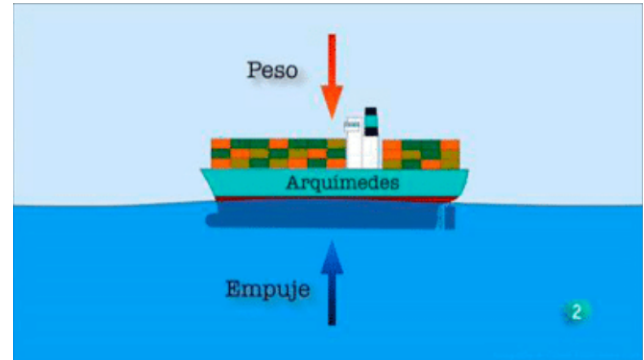
Centro de Carena: es el centro de gravedad del volumen de agua desplazado.



ARQUIMEDES

Principio de Arquímedes, que dice que todos los cuerpos sumergidos en un fluido son empujados hacia arriba por el propio fluido. En cierto modo, se hace menos fuerza para levantar una piedra si está dentro de una piscina, por eso flota una boya y también por eso flotan los barcos y se sumergen los submarinos. Se tienen que dar ciertas condiciones.

El principio de Arquímedes es el principio físico que afirma: «Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado». Esta fuerza recibe el nombre de empuje hidrostático o de Arquímedes, se mide en Newtons.

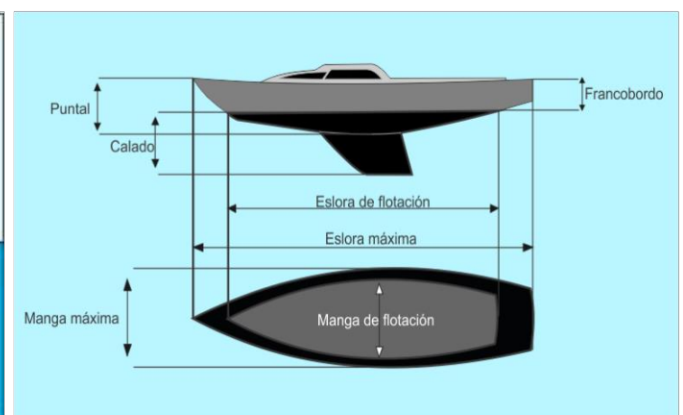
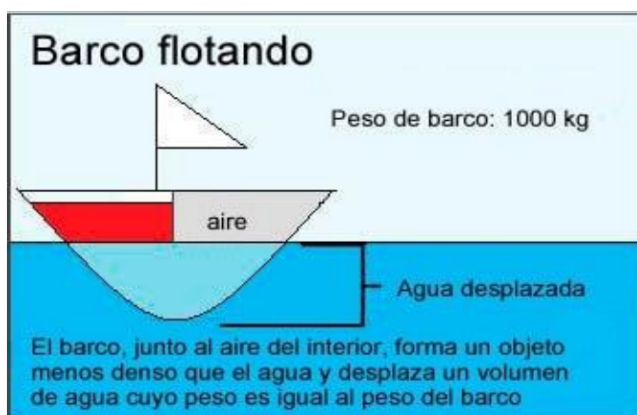


¿Por qué los submarinos se hunden y los barcos no?

Los **submarinos** se sumergen o flotan en el agua según aumente o disminuya su masa, manteniendo su volumen sin alteraciones.

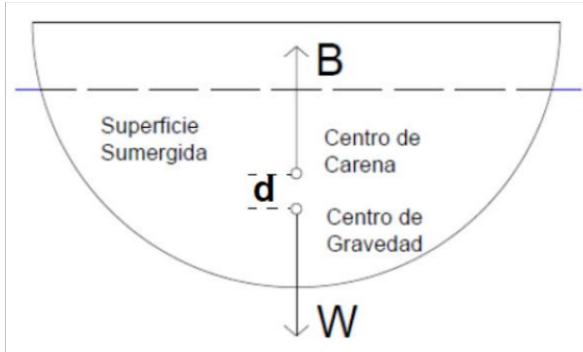
Para hundirse los **submarinos** aumentan su densidad llenando los tanques **de** agua marina. Para poder emerger la disminuyen expulsando el agua y llenando los tanques **de** aire consiguiendo su flotabilidad.

Un objeto **flota** si el empuje hidrostático es mayor que el peso.
Un objeto se hunde si el empuje hidrostático es menor que el peso.



CONSIDERACIONES DE FLOTABILIDAD

En la figura se pueden distinguir las fuerzas de flotación (B) y la fuerza peso (W) alineadas según la vertical, por lo tanto, sin crear momento. Además, al estar el centro de gravedad por debajo del centro de carena, pequeñas variaciones en la inclinación del vehículo producirán un momento corrector que tiende el vehículo a su posición inicial. La magnitud de ese momento corrector solo depende de la suma de las fuerzas de gravedad y flotación ($B+W$) y la distancia entre ellas en el plano horizontal. La ecuación que define este momento es la siguiente:



$$RM = \frac{1}{2} \cdot d \cdot (B + W)$$

Si, por el contrario, el centro de gravedad se encontrara por encima del centro de carena, el cuerpo se encontraría en un equilibrio inestable, cualquier pequeña perturbación provocaría un momento en la dirección opuesta a la de equilibrio, este efecto se retroalimentaría positivamente, hasta el momento del vuelco del vehículo, cuando se alcanzaría una nueva posición de equilibrio, ahora sí, con el centro de gravedad por debajo del centro de carena.

La fuerza de flotación se calcula aplicando el principio de Arquímedes: “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja”. Esto quiere decir que si, por ejemplo, nos encontramos con un vehículo parcialmente sumergido en una masa de agua, el empuje recibido por este cuerpo será en sentido ascendente y con una magnitud igual al volumen sumergido por la densidad del agua que lo rodea:

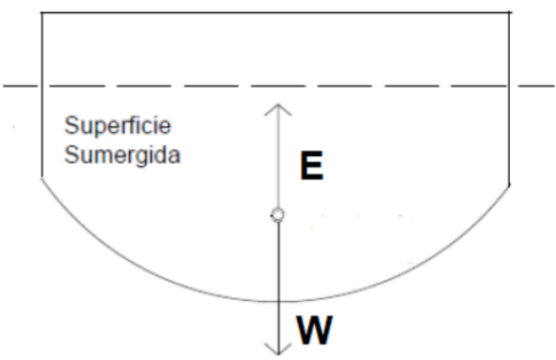
$$B = - \rho_{agua} \cdot V_{sum}$$

El **símbolo negativo** es debido a la orientación de los ejes de referencia, el eje z tiene el sentido orientado según la fuerza de la gravedad, hacia abajo, por lo tanto, la fuerza de flotación, de sentido ascendente, tiene signo negativo.

Los submarinos son capaces de variar su flotabilidad para realizar las maniobras de sumersión y emersión. Mediante el uso de cámaras que pueden almacenar tanto agua como aire con tanques de aire comprimido. De esta forma se puede manipular el peso del submarino para que sea mayor o menor que la fuerza de flotación.

Para vehículos submarinos más pequeños, el movimiento según el eje z se suele realizar con la ayuda de propulsores, y su flotabilidad es ligeramente positiva ($B > W$) para que en caso de fallo el vehículo flote a la superficie. [16] [17]

Analizando el Principio de Arquímedes: Se busca encontrar la variable que indica la flotabilidad de un cuerpo. El Barco u objeto que se sumerge parcial o totalmente en Agua experimenta un Empuje (E) y considerando el Peso del mismo (W), se puede expresar:



Empuje: Peso del vol de Agua
Peso cuerpo vs. Empuje

AGUA	CUERPO
$P_e \cdot V_{H_2O}$	$P_e \cdot V_{cuerpo}$
$d \cdot g \cdot V_{H_2O}$	$d_c \cdot g \cdot V_{cuerpo}$

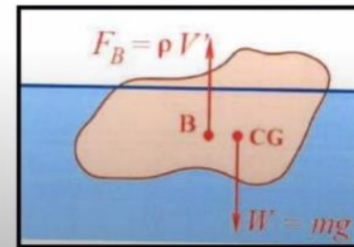
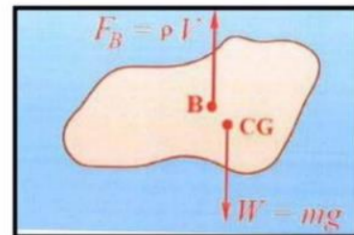
$d_{H_2O} = d_c$ equilibrio Indiferente

$d_{H_2O} < d_c$ hunde o Sumerge

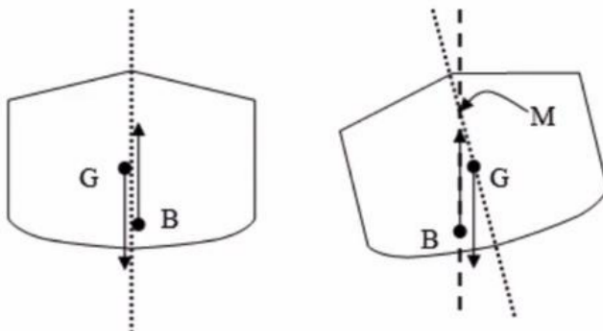
$d_{H_2O} > d_c$ Emerge o Flota

EMPUJE EN UN CUERPO SUMERGIDO

- En un cuerpo totalmente sumergido. El empuje se aplica al centroide o centro de masa (B) del volumen de agua desplazada que coincide con el volumen del cuerpo.
- En el caso de un cuerpo parcialmente sumergido, la flotabilidad se aplica a la centroide o centro de masa del volumen de agua desplazada (V').



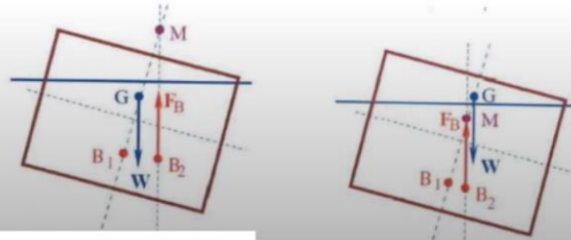
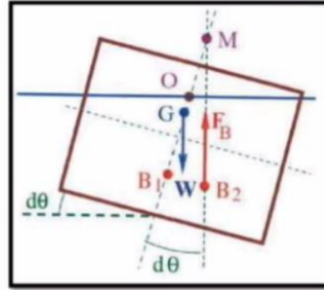
CONDICIÓN DE ESTABILIDAD PARA CUERPOS FLOTANTES



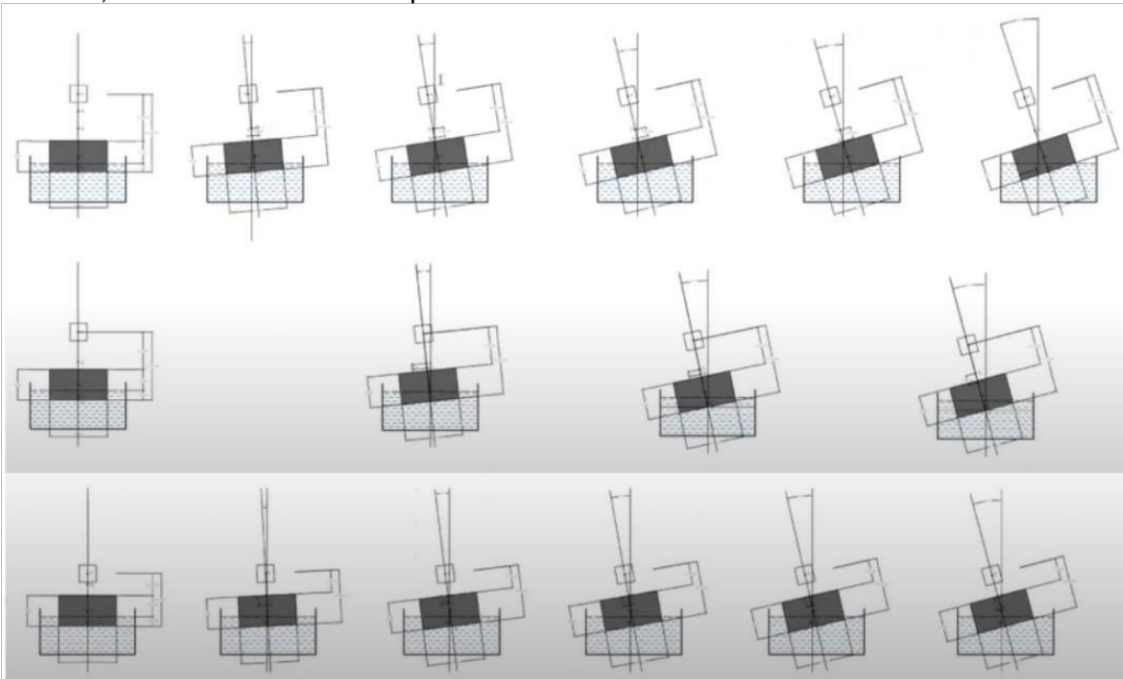
- Un cuerpo en un fluido es considerado estable si regresa a su posición original después de habersele girado un poco alrededor de un eje horizontal. Las condiciones para la estabilidad son diferentes para un cuerpo completamente sumergido y otro parcialmente sumergido (se encuentra flotando).
- Un cuerpo flotante es estable si su centro de gravedad (G) está por debajo del metacentro (M). El metacentro se define como el punto de intersección del eje vertical de un cuerpo cuando se encuentra en su posición de equilibrio y la recta vertical que pasa por el centro de flotabilidad (B) cuando el cuerpo es girado ligeramente.

CUERPOS FLOTANTES INCLINADOS

- La cantidad de flotabilidad no varía porque el peso corporal no varía, pero el punto de aplicación, es decir, el centroide, cambia su posición (de B_1 a B_2).
- La distancia entre el centro de gravedad (G) y el metacentro (M) se denomina "altura metacéntrica". Si $GM > 0$, el cuerpo está en condiciones de equilibrio estable. El equilibrio es inestable si $GM < 0$; mientras que, si $GM=0$, el equilibrio es Indiferente.



Ensayo de un cuerpo o cubeta rectangular hueca sobre un recipiente de Agua. Se modifica el Peso, altura e Inclinación respecto a la horizontal. Los resultados:



Conclusión: Para Cuerpos no sumergidos, al bajar el Centro de Gravedad, se puede aumentar el ángulo de inclinación manteniendo equilibrio estable y flotabilidad. [5]

NOTA. Ver los videos que muestran y ejemplifican [5]

<https://www.youtube.com/watch?v=-LabkzHSte0>

<https://www.youtube.com/watch?v=pc2R79q9ddo>

<https://www.youtube.com/watch?v=PuETglEQieU>

https://www.youtube.com/watch?v=9w4RMpCns_s

https://www.youtube.com/watch?v=9rf2o_HOJGE&t=847s

AMORTIGUAMIENTO HIDRODINÁMICO

La amortiguación hidrodinámica se puede definir como toda fuerza contraria al movimiento que se produce por efecto del movimiento del vehículo en el agua. Hay dos fenómenos que pueden producir amortiguación hidrodinámica, la fuerza de arrastre y la fricción superficial. Ambas fuerzas son proporcionales a la velocidad (v), de forma lineal en flujo laminar y de forma cuadrática en flujo turbulento.

En la mayoría de los casos tratamos con flujos turbulentos y una fricción superficial despreciable frente a la fuerza de arrastre (F_D). Para calcular esta fuerza podemos recurrir a la ecuación de arrastre:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua} \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A$$

Donde: A es el área del cuerpo sumergida en el fluido, perpendicular a la dirección de movimiento y C_D es el coeficiente de arrastre del cuerpo que dependerá de su forma.

Para minimizar esta fuerza en los vehículos marinos se intenta reducir los términos C_D , para ello se proporciona de una forma más pequeña y aerodinámica a la parte sumergida del vehículo que se enfrenta al flujo de agua. Por este principio se diseñan los barcos con formas alargadas y redondeadas en la parte sumergida, y con forma de torpedo los submarinos.

Este no es el caso de los ROV, ya que en ellos se busca la maniobrabilidad en las tres direcciones espaciales y su velocidad no suele ser muy elevada por lo que su efecto, aunque importante, no condiciona la forma del vehículo.

Se puede encontrar el equivalente de esta fuerza (F_D) para los vehículos terrestres en la amortiguación aerodinámica, aunque menor, debido a la baja densidad del aire, su efecto es importante a grandes velocidades, se tiene en cuenta para el diseño de automóviles, pero es especialmente llamativo en trenes de alta velocidad donde el diseño de la parte frontal es esencial para alcanzar una mayor velocidad punta. Por supuesto este efecto en vehículos aéreos, como aviones y naves espaciales, tiene gran importancia y condiciona su forma como consecuencia. [16] [18]

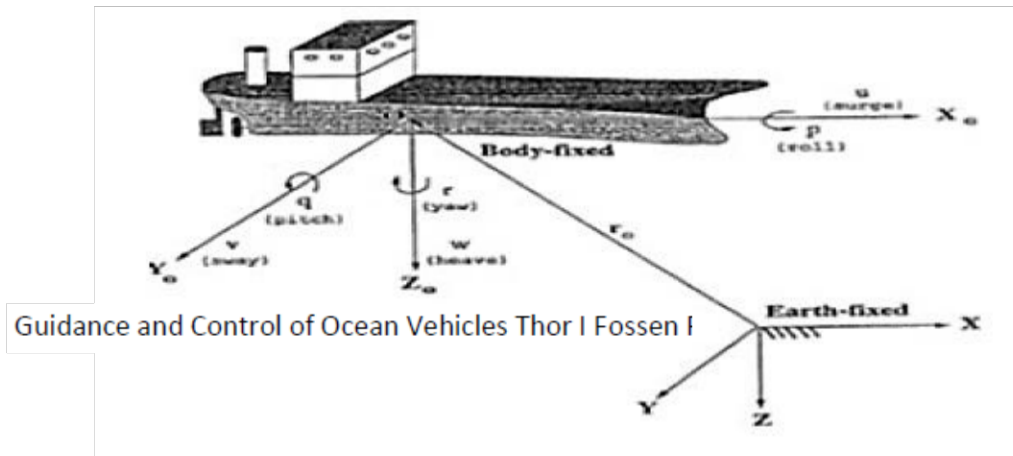
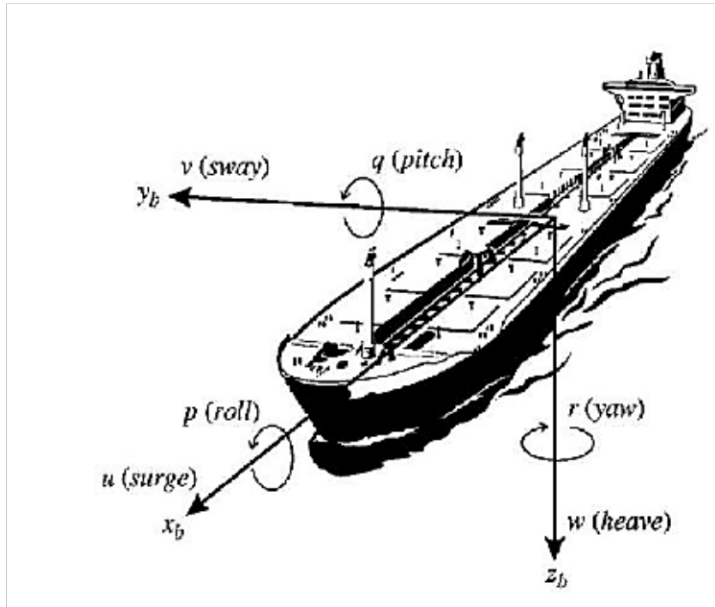
ESTRUCTURA DE UN VEHICULO AUTONOMO DE SUPERFICIE (ASV)

Cualquier vehículo marino es capaz de rotar sobre tres ejes imaginarios perpendiculares. EL punto donde coinciden esos ejes se denomina centro de gravedad.

El eje longitudinal se prolonga, de popa a proa (x_b); el transversal, de babor a estribor (y_b) y el vertical, es el que pasa por el centro de gravedad y es perpendicular a los dos ejes anteriores (z_b). Alrededor de estos tres ejes, se generan rotaciones básicas del vehículo marino, las cuales se describen a continuación:

- Rotación sobre el eje x_b se denomina alabeo (roll en inglés), variable ϕ
- Rotación sobre el eje y_b se denomina cabeceo (pitch en inglés), variable Θ
- Rotación sobre el eje z_b se denomina quiñada (yaw en inglés), variable Ψ

Las tres coordenadas (x ; y y z) y sus derivadas con respecto al tiempo se usan para describir las posiciones y velocidades traslacionales del cuerpo a lo largo de los ejes XYZ.



Las otras variables rotacionales y sus derivadas describen la orientación y las velocidades angulares alrededor de los ejes XYZ. Para esto se utiliza la notación SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950). Se ve en la Tabla 1

Grado de libertad		Fuerzas y movimientos	Velocidades lineal y angular	Posiciones y ángulos de euler
1	Movimiento en dirección de x (surge)	X	u	x
2	Movimiento en dirección de y (sway)	Y	v	y
3	Movimiento en dirección de z (heave)	Z	w	z
4	Rotación sobre x (roll, heel)	K	p	ϕ
5	Rotación sobre y (pitch, trim)	M	q	θ
6	Rotación sobre z (yaw)	N	r	ψ

Con esta información se establece la Cinemática del Sistema

Para vehículos acuáticos la fuerza de gravedad es despreciable debido a que no genera un efecto considerable en vehículos acuáticos que tienen bajas velocidades de actuación, debido a esto se puede considerar que la posición y orientación se describen con respecto a un eje de referencia inercial XYZ (Earth-fixed en la Figura). La velocidad lineal y angular se describen con respecto al sistema de coordenadas del eje principal de inercia (Body-fixed en la Figura). Como expone Fossen de acuerdo a la notación SNAME (1950) los 6 grados de libertad del vehículo pueden ser descritos por los siguientes vectores:

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]; \quad \eta_1 = [x, y, z]^T; \quad \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$$

$$v = [v_1^T, v_2^T]; \quad v_1 = [u, v, w]^T; \quad v_2 = [p, q, r]^T$$

La variable η expresa los vectores de posición y orientación con coordenadas en el eje Earth-fixed, mientras que v expresa los vectores de velocidad lineal y angular con coordenadas en el eje Body-Fixed.

Dado que el vehículo no es sumergible se puede considerar que la posición en el eje z y la velocidad lineal w tiene un valor de 0, igualmente las variables de orientación ϕ y θ se pueden asumir con un valor de 0, esto porque al no ser sumergible y estar diseñado para aguas poco turbias el cambio de orientación en los planos XZ y YZ son despreciables.

La ecuación para la velocidad lineal del vehículo con respecto al eje de referencia inercial está definida según Fossen con la ecuación:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1$$

Donde $J_1(\eta_2)$ es una matriz de transformación que está relacionada con los ángulos de Euler: ϕ, θ, ψ , y es obtenido por la rotación del sistema de referencia inercial XYZ haciendo uso de las matrices principales de rotación $C_{x,\phi}$, $C_{y,\theta}$ y $C_{z,\psi}$ mostradas en la ecuación , rotando un ángulo ψ sobre el eje Z, seguido de la rotación de un ángulo θ sobre el eje Y, y finalmente la rotación del ángulo ϕ sobre el eje X. Esta rotación queda definida

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_1(\eta_2) = C_{z,\psi}C_{y,\theta}C_{x,\phi}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene la matriz de transformación $J_1(\eta_2)$ la cual se puede simplificar por las condiciones de modelamiento dadas al vehículo $\phi = 0$ y $\theta = 0$, obteniendo la matriz de transformación definitiva en la ecuación .

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + s\phi c\psi s\theta & s\psi s\phi + c\phi c\psi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\psi s\theta & -c\psi s\phi + c\phi s\psi s\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ahora para la ecuación de velocidad angular también definida según Fossen corresponde a la ecuación:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2$$

Donde $J_2(\eta_2)$ corresponde a la ecuación 22, a la cual se aplican las condiciones iniciales $\phi = 0$ y $\theta = 0$, obteniendo la matriz de transformación definitiva en la ecuación 23

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones características pueden ser expresadas en forma de vector de la siguiente forma

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

Como resultado se reemplaza cada vector en la ecuación anterior obteniendo un vector que define cada variable de cada grado de libertad del modelo en la ecuación siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Las variables u y v se pueden definir como los componentes x y y de la velocidad lineal del vehículo, esto se expone en la ecuación :

$$u = V \cos \psi$$

$$v = V \sin \psi$$

De esta manera las ecuaciones de movimiento que describen el **Modelo Cinemático** del vehículo acuático se representan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} uc\psi - vs\psi \\ us\psi + vc\psi \\ r \end{bmatrix}$$

MODELO CINEMATICO PARA UN (ASV) VEHICULO AUTONOMO DE SUPERFICIE

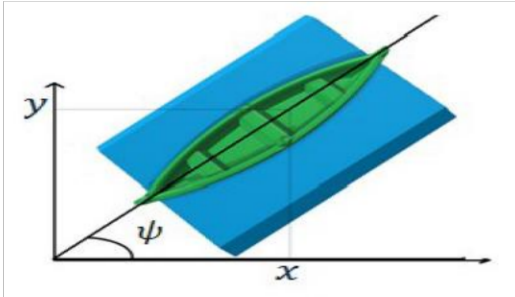


Figura obtenida Referencia [6]

Ecuación Generalizada de la Cinemática

Considerando el análisis de movimientos separados, traslación y rotación, se puede hacer un planteo diferenciado de la cinemática. Según el autor Eduardo Canales [7]

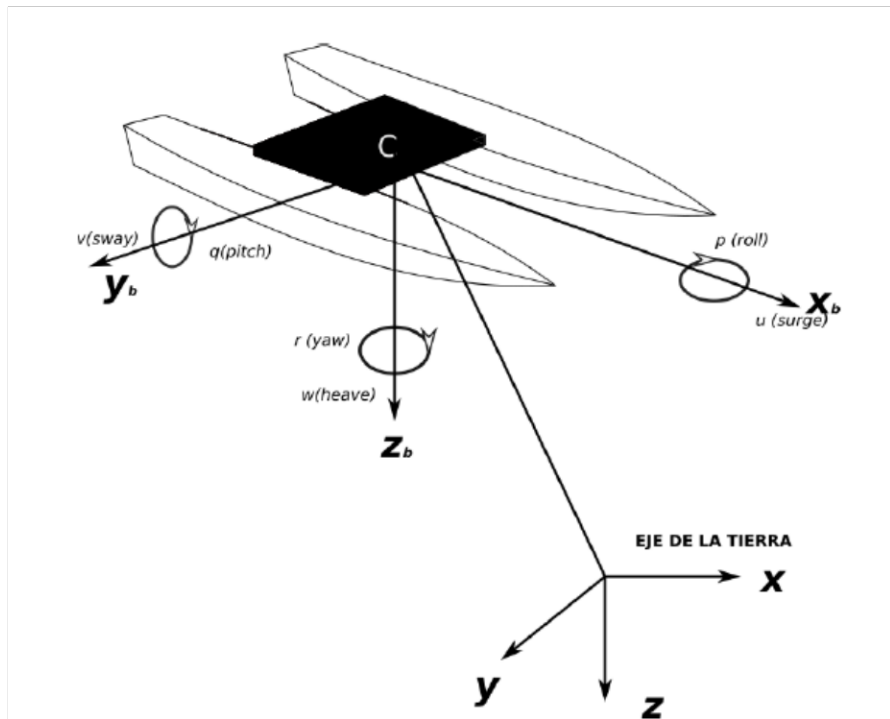


Figura. obtenida Referencia [7]

Ecuaciones de Cinemática Traslacional

La transformación entre las velocidades de cuerpo rígido y la derivada con respecto al tiempo del sistema NED puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{e} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = R_b^n(\Theta_{nb}) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

donde la transformación lineal $R_b^n(\Theta_{nb})$ está dada por:

$$R_b^n(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

donde $s \equiv \sin(\cdot)$ y $c \equiv \cos(\cdot)$.

Ecuaciones de Cinemática Rotacional

La transformación entre las velocidades angulares de cuerpo rígido ω_{nb}^b y la derivada con respecto de los ángulos de Euler $\dot{\Theta}_{nb}$ es:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_{\Theta}(\Theta_{nb}) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

donde la matriz de transformación angular-velocidad $T_{\Theta}(\Theta_{nb})$ está expresada por:

$$T_{\Theta}(\Theta_{nb}) \triangleq \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}; \quad (2.8)$$

donde $t \equiv \tan(\cdot)$ y $c\theta \neq 0$.

Ecuación Generalizada de la Cinemática

Usando los resultados anteriores podemos definir la transformación cinemática para coordenadas de maniobrabilidad:

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu, \quad (2.9)$$

donde:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta_{nb}) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\Theta_{nb}) \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

es la matriz de transformación compuesta por las ecuaciones 2.6 y 2.8.

DINAMICA DEL VEHICULO AUTONOMO DE SUPERFICIE

Según el autor [7] se puede analizar en forma análoga el modelo dinámico

Dinámicas de Rotación y Traslación

Las ecuaciones dinámicas de translación de un vehículo de superficie se pueden expresar de la siguiente manera (Fossen, 1994):

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})], \end{aligned} \quad (2.11)$$

siendo X, Y, Z la suma de las fuerzas que actúan sobre el vehículo y el vector

$$c_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T, \quad (2.12)$$

corresponde a las coordenadas de centro de masa del vehículo con respecto a su origen. Del mismo modo las ecuaciones dinámicas de rotación del vehículo se pueden expresar mediante (Fossen, 1994):

$$\begin{aligned} K &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &\quad + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ &\quad + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ N &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ &\quad + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)], \end{aligned} \quad (2.13)$$

siendo K, M, N la suma de los momentos que actúan sobre el vehículo e I_z la matriz del tensor de inercia expresada por

$$I_c \triangleq \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Estos esfuerzos externos se producen debido a fenómenos físicos como las masas adicionadas, los arrastros (avance y cruzado), esfuerzos generados por los propulsores y esfuerzos tanto restauradores como de sustentación (Cutipa-Luque, 2012). Los coeficientes serán abordados con mayor detalle en la siguiente sección.

Ecuación General de la Dinámica

Las dinámicas de las ecuaciones de movimiento de 3GDL se pueden expresar mediante la ecuación general de la dinámica (Fossen, 1994):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau_c, \quad (2.15)$$

donde:

M = matriz de inercias (incluidas las masas adicionadas).

$C(\nu)$ = matriz de Coriolis y términos centrípetos (incluidas las masas adicionadas).

$D(\nu)$ = matriz de amortiguamiento.

τ_c = vector de entradas de control

El movimiento en el plano horizontal de un vehículo de superficie es descrito usualmente mediante las componentes de surge, sway y yaw. Para ello elegimos $\nu = [u, v, r]^T$ y $\eta = [x, y, \psi]$. Esto implica que las dinámicas asociadas a los movimientos de heave, roll y pitch son desestimadas, $w = p = q = 0$. Además se asume que la embarcación tiene una masa homogéneamente distribuida en el plano xz lo cual implica que $I_{xy} = I_{yz} = 0$ (Fossen, 1994). Teniendo en cuenta esos supuestos y de (2.11) y (2.13) tenemos que:

$$\begin{aligned} \text{Surge :} \quad m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X, \\ \text{Sway :} \quad m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y, \\ \text{Yaw :} \quad I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N, \end{aligned} \quad (2.16)$$

siendo el valor de I_z :

$$I_z = m x_G^2 + I_r, \quad (2.17)$$

donde m (Kg) es la masa del casco, además:

$$I_r = m r^2, \quad (2.18)$$

donde r denota el radio de giro, $0,15L < r < 0,3L$, entonces el momento de inercia del vehículo sobre el eje z será:

$$I_z = 206,1 \text{ kg/m}^2. \quad (2.19)$$

Si consideramos el origen en la línea central de la embarcación tenemos que $y_G = 0$ con lo cual la ecuación dinámica que describe el movimiento de la embarcación es de la siguiente forma (Fossen, 2011):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = b\tau, \quad (2.20)$$

donde \mathbf{b} es la matriz de control que describe la configuración de los propulsores y τ es el vector de entradas. Los componentes de las matrices de \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{D} son respectivamente:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - Y_{\dot{r}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

donde \mathbf{M} representa a la matriz de masas adicionadas e inercias, esta se comprende como las fuerzas y momentos de presión debido al movimiento armónico sobre el cuerpo y proporcional a la aceleración del mismo (Fossen, 2002; Klinger *et al.*, 2016; Wirtensohn *et al.*, 2013).

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G r + Y_{\dot{v}} v + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} \\ mr & 0 & -X_{\dot{u}} u \\ mx_G r - Y_{\dot{v}} v - \frac{Y_{\dot{r}} - N_{\dot{v}}}{2} r & X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

La matriz $\mathbf{C}(\nu)$ de Coriolis y términos centrípetos se produce debido a la rotación del cuerpo y puede ser derivada usando una formulación de energía sobre la matriz \mathbf{M} (Fossen, 2002).

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u + X_{|u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{|v|v}|v| & 0 \\ 0 & 0 & N_r + N_{|r|r}|r| \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

La matriz $\mathbf{D}(\nu)$ representa los amortiguamientos, tanto lineales como cuadráticos, cuya significancia dependerá de la velocidad del vehículo, siendo los términos cuadráticos más significativos a altas velocidades. Aún así se debe considerar los términos lineales ya que su ausencia puede producir oscilaciones a bajas velocidades (Fossen, 2011). Más detalle sobre los términos que conforman estas matrices son tratados adelante.

OTRAS CONSIDERACIONES DINÁMICAS.

Para el cálculo dinámico se deben considerar otras Fuerzas y Momentos externos a la Embarcación y así poder determinar el modelo dinámico del vehículo autónomo de superficie. Existen varios modelos analíticos y empíricos desarrollados. Se mencionan algunos aspectos.

Estos temas se encuentran en la Bibliografía de Referencia [5]

RESISTENCIA DE LA EMBARCACIÓN

La resistencia puede definirse como una fuerza originada por el fluido en oposición al avance de la embarcación y proporcional a la velocidad de la misma. (Harvald, 1992) El término resistencia es usado preferiblemente en la hidrodinámica de embarcaciones, mientras que el término arrastro es usado mayormente en aerodinámica y cuerpos sumergidos (Cutipa-Luque, 2012; Hoerner, 1965; Rentschler, 2001). Un término generalizado para hallar la resistencia de una embarcación está dado por la expresión:

$$R = \frac{1}{2}\rho S U^2 C_T(F_n, R_n), \quad (2.24)$$

donde

- S es la superficie sumergida del casco, que está en contacto con el fluido.
- F_n un término adimensional conocido como número de Froude.
- R_n es un término adimensional conocido como número de Reynolds y está relacionado al tipo de fluido, ya sea régimen laminar o turbulento.
- C_T es el coeficiente adimensional que llamaremos coeficiente de resistencia total basados en F_n , R_n y la geometría del casco.

- Resistencia viscosa.
- Resistencia a las olas.
- Resistencia incremental.

La figura 2.4 muestra la curva de resistencia del casco, se puede observar el carácter exponencial de la resistencia con relación a la velocidad del vehículo U m/s. Se puede ajustar esta curva a un polinomio de segundo grado de la forma

$$R(u) = R_{uu}u^2 + R_u u, \quad (2.25)$$

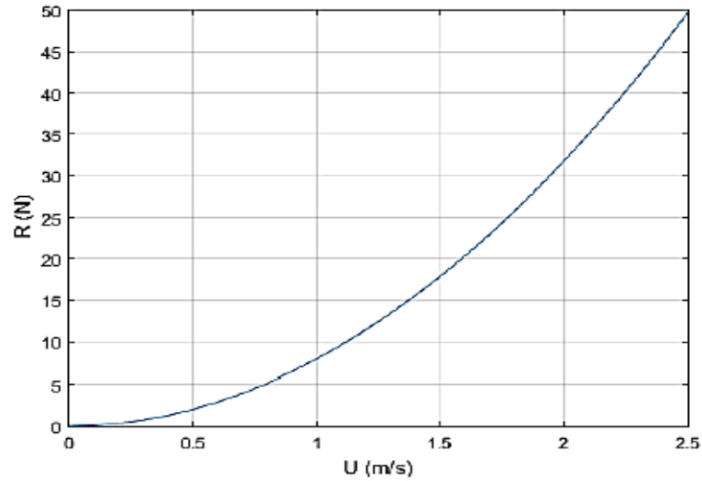


Figura 2.4: Resistencia del casco.

donde $R_{uu}=7.7608 \text{ kgm}^{-1}$ y $R_u=0.1456 \text{ kgs}^{-1}$.

MASAS ADICIONADAS. AXIAL Y CRUZADA

La masa adicionada puede ser comprendida como las fuerzas y momentos inducidos por la presión debido a los movimientos armónicos forzados por el cuerpo del vehículo los cuales son proporcionales a la aceleración del mismo (Fossen, 1994). Podemos entonces definir la masa adicionada m como la magnitud de la fuerza hidrodinámica en la dirección i debido a la unidad de aceleración en la dirección j . Siendo el rango de i y j variantes de 1 a 3 correspondientes a los movimientos de surge, sway y yaw (Lewandowski, 2004).

Masa Adicionada Axial

Para estimar la masa adicionada axial, de forma análoga al cálculo de los arrastros, aproximamos la forma del vehículo a una elipse (Rentschler, 2001).

$$X\dot{u} = -m_{11} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{L}{2}\right) \left(\frac{T}{2}\right)^2, \quad (2.31)$$

donde T es el diámetro de la elipse propuesta, ρ es la densidad del fluido circundante (agua) y α es un parámetro empírico calculado por la relación entre la longitud del vehículo y su diámetro (Rentschler, 2001) como se aprecia en la tabla 2.3. Para el vehículo propuesto $L/T=(3.0)/(0.3)=10$ entonces $a=$ a 0.0271 y $m_{11}=-1.2353$.

Tabla 2.3: *Parámetros α de la masa adicionada axial.*

L/T	α
0.01	-
0.1	6.148
0.2	3.008
0.4	1.428
0.6	0.9078
0.8	0.6514
1.0	0.5000
1.5	0.3038
2.0	0.2100
2.5	0.1563
3.0	0.1220
5.0	0.05912
7.0	0.03585
10.0	0.0271

Masas Adicionales Cruzadas

Las masas adicionadas cruzadas son calculadas mediante el enfoque de teoría de fajas. Integrando la expresión 2.30 a lo largo de la longitud del casco tenemos, llegamos a las siguientes ecuaciones (Brennen, 1982; Prestero, 1994):

$$Y_{\dot{v}} = - \int_{-L/2}^{L/2} m_a dx, \quad (2.32)$$

$$Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}} = - \int_{-L/2}^{L/2} x m_a dx, \quad (2.33)$$

$$N_{\dot{r}} = - \int_{-L/2}^{L/2} x^2 m_a dx. \quad (2.34)$$

FUERZAS Y MOMENTOS TOTALES EN EL CASCO DE LA EMBARCACIÓN.

Del estudio hidrodinámico de las fuerzas y momentos que actúan sobre el casco del vehículo obtenemos las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u u + X_{uu} u^2, \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_v v + Y_{vv} v^2 + Y_{\dot{r}} \dot{r}, \\ I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r + N_{rr} r^2 + N_{\dot{v}} \dot{v}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Estas expresiones han sido obtenidas mediante expansiones en serie de Taylor (Fossen, 2011, 1994; Pandey e Hasegawa, 2016). Este tipo de representación suele tener el inconveniente de presentar muchos términos, afortunadamente podemos reducirlos mediante algunos supuestos (Fossen, 2011):

- La mayoría de las maniobras de las embarcaciones se pueden describir mediante una expansión de Taylor truncada en el tercer orden al rededor de la condición de estado estacionario $u = u_0$.
- Solo los términos de aceleración de primer orden son considerados.
- La simetría estándar de babor/estribor se simplifica.
- El acoplamiento entre los términos de aceleración y velocidad es despreciable.

Los coeficientes hidrodinámicos del casco se muestran en la siguiente tabla 2.4:

Tabla 2.4: *Coefficientes hidrodinámicos del casco, $U=1.5$ m/s.*

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
X_u	-0.1456	Kg/s	Arrastro Axial
X_{uu}	-7.7608	Kg/m	Arrastro Axial
$X_{\dot{u}}$	-1.2353	Kg	Masa Adicionada
Y_v	-61.7662	Kg/s	Arrastro Cruzado
Y_{vv}	-19.4638	Kg/m	Arrastro Cruzado
$Y_{\dot{v}}$	-123.5324	Kg	Masa Adicionada
$Y_{\dot{r}}$	-185.2987	Kg.m/rad	Masa Adicionada
N_r	-370.5973	Kg.m ² /rad.s ²	Arrastro Cruzado
N_{rr}	-131.3805	Kg.m ² /rad ²	Arrastro Cruzado
$N_{\dot{r}}$	-370.5973	Kg.m ² /rad	Masa Adicionada
$N_{\dot{v}}$	-185.2987	Kg.m	Masa Adicionada

OTRAS CONSIDERACIONES DINÁMICAS.

Se refieren al Mar u Oceano donde la embarcación desarrolla su accionar. Los Vientos provocan perturbaciones que dificultan la maniobrabilidad. Las Olas generan un problema aún mayor por su gran variabilidad en periodo de ocurrencia, profundidad o altura, dirección y fuerza. Es por esto que se desarrollan adicionalmente, modelos de comportamiento frente a Vientos, Olas y Corrientes marinas.

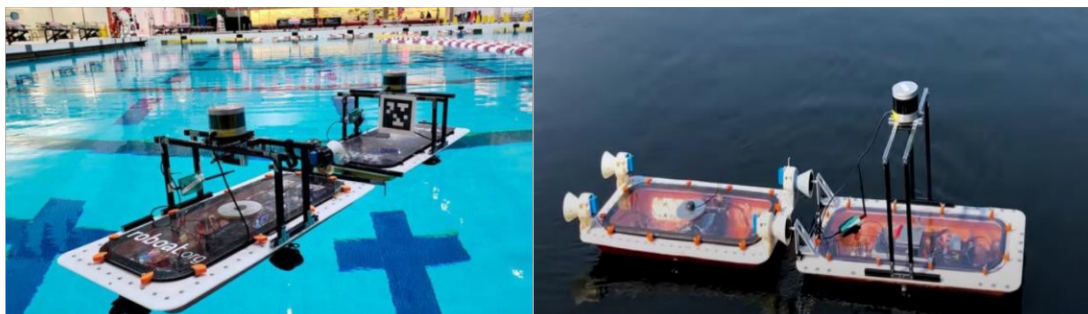
ROBOTS ACUATICOS DE SUPERFICIE.

En base a lo desarrollado se pueden diseñar sistemas dinámicos autónomos que pueden realizar multiples aplicaciones. Se menciona, entre otras:

Roboat: Los robots acuáticos autónomos que se reconocen entre sí y forman estructuras

El MIT y el Instituto AMS crean robots autónomos que podrían usarse como nuevos modos de transporte y ayudar a mejorar el flujo de tránsito en los canales de Ámsterdam.

https://www.hibridosyelectricos.com/coches/roboat-robots-acuaticos-autonomos-reconocen-forman-estructuras_28686_102.html



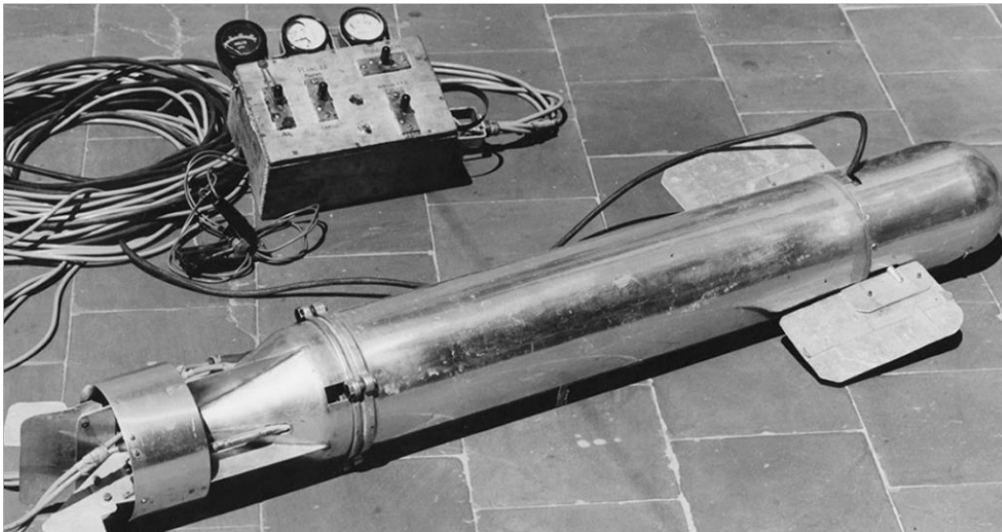
<https://www.youtube.com/watch?v=HzPlzvSXSDM&t=6s>

ROBOTICA MOVIL SUBMARINA

LOS ROBOTS SUBMARINOS

Se inicia el estudio en la década del 50. Robot Submarino operado en forma remota "POODLE" desarrollado por Dimitri Rebikoff en Francia

<https://www.subaquaticamagazine.es/los-drones-submarinos-de-dimitri-rebikoff-origenes-del-mundo-rov/>



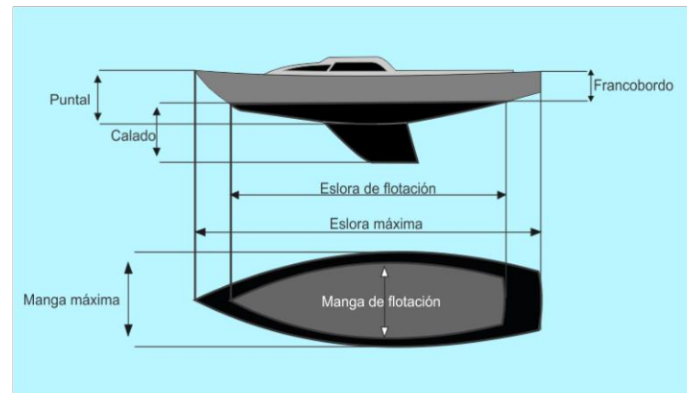
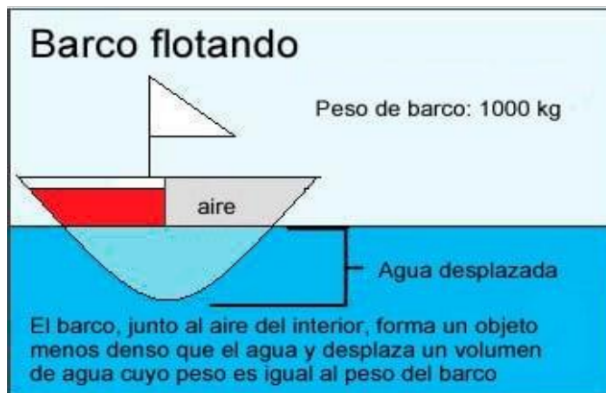
¿Cómo hace un Submarino para Sumergirse o Emerger?

Los submarinos usan los depósitos de proa y popa, llamados depósitos principales, que se abren y se llenan completamente de agua para sumergirse o se llenan de aire a presión para emerger.

El principio de **funcionamiento** se basa en la búsqueda de un equilibrio entre el peso del buque que tiende a hacerlo hundir y el empuje hidrostático que tiende a hacerlo flotar.

Un objeto **flota** si el empuje hidrostático es mayor que el peso.

Un objeto se hunde si el empuje hidrostático es menor que el peso.



LOS SUBMARINOS Y LA AERODINAMICA

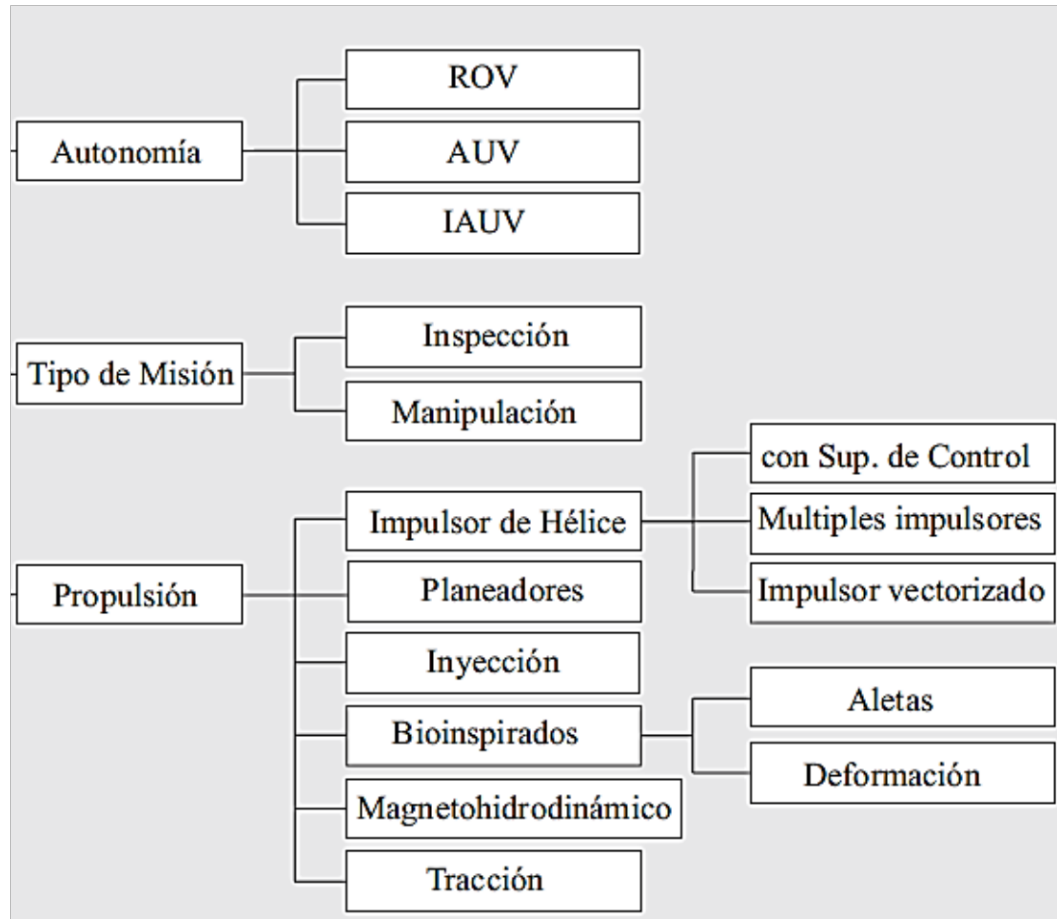
El submarino es una nave que puede navegar tanto por la superficie del mar como por debajo de la misma. Tienen forma de ballena para ser más aerodinámicos dentro del agua. Cuando un cuerpo está dentro del agua actúan sobre él dos fuerzas: el peso del cuerpo, que va hacia abajo, y el empuje del agua sobre el cuerpo, que va hacia arriba. Según el principio de Arquímedes, el empuje del agua es igual al peso del volumen de agua ocupado por el cuerpo.

Como el peso y el empuje tienen sentidos distintos podemos tener estas tres situaciones:

- 1) Si el cuerpo es más denso que el agua, el peso es mayor que el empuje y el cuerpo se hunde.
- 2) Si la densidad del cuerpo es igual a la del agua, el peso y el empuje son exactamente iguales. Entonces el cuerpo puede flotar suspendido a cualquier profundidad, pero con una pequeña perturbación o bien sale a flote a la superficie o bien se hunde del todo.
- 3) Si el cuerpo es menos denso que el agua, el empuje es mayor que el peso. En este caso el cuerpo flota en la superficie, y para hundirlo hay que empujarlo hacia abajo o atarle un lastre.

ROBOT SUBMARINO. CARACTERISTICAS.

CLASIFICACION



➡ AUTONOMÍA.

AUVs. (*Autonomous Underwater Vehicle*). Son completamente autónomos. Tienen la programación de la actividad a desarrollar y poseen su propia fuente de energía (baterías). Los datos que recopila el vehículo se almacenan en su memoria interna. Se utilizan para tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración debajo del hielo.

ROVs. (*Remotely Operated Vehicle*)
Controlados continuamente por un operador
El usuario define los comandos a ejecutar. El ROV envía las señales de sus sensores (presión, temperatura, imágenes, etc)

IAUVs. (*Intervention Autonomous Underwater Vehicle*). Nivel intermedio de autonomía. Tienen o aprovechan las características de los otros dos. Una aplicación de mayor uso es la búsqueda de cajas negras de aviones, materiales u objetos de gran interés o valor.

TIPO DE MISIÓN

De INSPECCIÓN u Observación.

adquirir imágenes, observación del lecho marino, cartografía acústica, Calidad del agua, Revisión de instalaciones submarinas como Estructuras, tuberías y cables.

De MANIPULACIÓN o Intervención.

Aplica en: Apertura y cierre de válvulas subacuáticas, la desactivación de minas, la recolección de muestras, Controlar las fugas de contaminante o rescate de personas

“Principal diferencia es que el de Manipulación o Intervención posee herramientas o un brazo robótico”.

PROPULSION

El sistema de propulsión de un robot submarino define completamente los tipos de movimientos y maniobras que este puede realizar.

Los sistemas de propulsión están en relación al consumo de energía, el hardware del robot, y el efecto que el robot genera en el ambiente marino.

IMPULSORES DE HÉLICE

Es el más utilizado. Consiste generalmente en un motor eléctrico, se acopla una hélice que al girar produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida. Los modelos matemáticos de impulsores son una aproximación para describir el comportamiento porque influyen muchos factores: la forma, diámetro y área de las aspas; la velocidad de giro de la hélice, la densidad y viscosidad del agua, temperatura y más. Existen diferentes modelos (Yoerger et al., 1990) (Bachmayer et al., 2000). Se usa un modelo matemático sencillo en el que la fuerza del impulsor es proporcional al cuadrado de la velocidad angular de la hélice, y esta velocidad proporcional al voltaje del motor.

DESVENTAJA: Producen ruido en el ambiente marino que altera la vida marina.

IMPULSOR DE HÉLICE Y SUPERFICIES DE CONTROL.

Este tipo de sistema de propulsión es el que más se usa en submarinos de gran envergadura y AUVs. Utilizan aletas o timones para obtener los movimientos de cabeceo, viraje y balanceo. Este sistema presenta una gran simplicidad.

DESVENTAJA: maniobrabilidad es muy reducida, especialmente a baja velocidad.

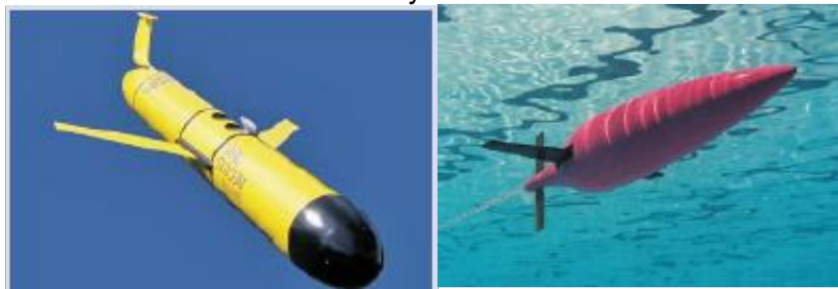
MÚLTIPLES IMPULSORES. Es el sistema más utilizado en los ROVs. Consiste en colocar un número de impulsores para aportar maniobrabilidad al Robot submarino según los grados de libertad. A pesar de que los impulsores de mayor importancia para ejecutar la navegación se colocan en la parte trasera y a los lados del robot submarino, no hay una regla específica para la ubicación y orientación. Se utiliza en trabajos de manipulación e inspección por su precisión en el posicionamiento y su capacidad para gobernar los grados de libertad independientemente. Los robots submarinos que utilizan el sistema de arreglo de impulsores suelen tener forma cúbica o esférica.

DESVENTAJA: Alto consumo de energía por la cantidad de impulsores.

IMPULSOR VECTORIAL. La impulsión vectorial es la capacidad de un robot submarino para orientar o posicionar un impulsor con el objetivo de controlar su propio movimiento. En los robots submarinos con impulsor vectorial, el propulsor se coloca en la parte trasera, de forma similar a la de los vehículos con un impulsor fijo y aletas de guiado, pero en este caso el impulsor no está fijo, ya que tiene la capacidad de orientarse. El desarrollo de robots submarinos con impulsores vectoriales es relativamente reciente. En algunos trabajos de investigación se ha analizado la dinámica de este tipo de vehículos y se ha encontrado que presenta grandes ventajas para la navegación y guiado con precisión (Le Page and Holappa, 2000), (Morel and Leonessa, 2003).

PLANEADOR ACUÁTICO

Los robots submarinos planeadores no disponen de impulsor de hélice. Estos han sido diseñados para deslizarse desde la superficie del mar hasta una profundidad programada, luego cambian su flotabilidad y cabeceo para ir en dirección ascendente hasta llegar a un punto prefijado donde vuelven a descender y así sucesivamente.



El avance se obtiene por medio de la inclinación de las aletas, que se consigue al combinar pequeñas variaciones de la posición y magnitud de la fuerza de flotabilidad. Como resultado se obtiene un movimiento de desplazamiento diagonal con un mínimo consumo de energía.

BIOINSPIRADOS

Este tipo de sistema de propulsión está inspirado en la fisiología de los peces o los cetáceos, y con ello su forma de desplazarse en el agua. El sistema más simple consiste en una aleta con un grado de libertad colocada vertical u horizontalmente en la parte trasera del vehículo submarino. Su movimiento cíclico perpendicular al plano de las aletas, produce ondas de agua que impulsan el vehículo hacia adelante. Este movimiento produce empuje en un solo sentido.



INYECCIÓN

La propulsión por inyección consiste en recoger agua del exterior para luego almacenarla en un depósito y finalmente expulsarla mediante una bomba, inyectándola al medio acuático a través de una boquilla. El agua es forzada a salir a alta presión por la boquilla y la fuerza de empuje del agua produce una aceleración en el vehículo. Cuando se puede controlar la orientación de la boquilla, es posible obtener un empuje en diversas direcciones.

Son considerados sistemas no convencionales, y se pueden emplear en aplicaciones de alta velocidad. Estos proveen una alternativa viable al impulsor convencional de hélice. Por otro lado, son más apropiados para proteger el medio ambiente, ya que evitan daños o heridas a seres acuáticos que pueden ser causadas por el contacto de una hélice en movimiento.

IMPULSOR MAGNETOHIDRODINÁMICO (MHD)

El principio de funcionamiento de los impulsores magnetohidrodinámicos consiste en hacer circular corriente eléctrica por un fluido conductor (agua salada) el cual es atravesado por un campo magnético. El impulsor MHD genera el movimiento del fluido debido a la interacción del campo magnético y la corriente que circula a través de él. La ventaja que presenta este tipo de sistema de propulsión es que no tiene partes móviles,

DESVENTAJA: los electrodos reducen notablemente el rendimiento electromecánico, debido a su disolución y al desprendimiento de gases causados por la electrólisis de los materiales afectados. Otro problema es que se requieren campos magnéticos de alta intensidad para obtener una fuerza de propulsión considerable. Eficiencia del 50%.



TRACCIÓN

Es similar a la técnica utilizada por los robots terrestres, con la diferencia que el peso del vehículo en el agua se puede neutralizar mediante la flotabilidad del mismo, y que en el agua hay fuerzas de fricción viscosa que son mucho mayores que en el aire. Los vehículos submarinos podrían desplazarse mediante patas, ruedas u orugas.

DISEÑO DE UN ROBOT SUBMARINO

- Profundidad de operación, por lo tanto, Presión hidrostática que va a soportar
- Niveles de temperatura que va resistir.
- Resistencia a la corrosión.
- Volumen Total del robot.
- Dimensiones. Diseño Aerodinámico de menor resistencia (Forma de Ballena)
- Fuerzas de arrastre que se generan por el movimiento del robot.
Son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot.
Cuando el robot se mueve a velocidad constante, $F_{\text{impulsor}} = F_{\text{de arrastre}}$.
Las fuerzas de arrastre dependen en gran medida de la geometría del Robot.

SENSORES. ROBOT SUBMARINO

Sensores de Posicionamiento, Estado interno, Medición del Ambiente

- **SENSORES de Posicionamiento**

GPS para posicionamiento global.

Unidad de medición inercial (IMU). Aceleración lineal y la velocidad angular.

Se usan 3 giróscopos para medir los ángulos de: cabeceo, alabeo y guiñada.

VELOCÍMETRO de navegación.

Se basa en 3 ó 4 ondas ultrasónicas, con dirección diagonal hacia el fondo, ligeramente inclinado a los lados, al frente y hacia atrás. Mediante el análisis de los ecos recibidos y sus correlaciones, calcula velocidad. La posición se obtiene indirectamente por odometría.

SONAR para detección de obstáculos. La diferencia de tiempo entre la emisión de la señal acústica y el eco recibido determina la distancia.

SENSOR DE PROFUNDIDAD.

Sensor de presión absoluta. La presión ejercida en el sensor es proporcional a la columna de agua multiplicada por su densidad más la presión atmosférica.

SISTEMAS DE VISIÓN.

Otra aplicación de los sistemas de visión es obtener estimaciones del movimiento relativo y absoluto usando un algoritmo tipo SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) es decir, localización y mapeo simultáneos.

- **SENSORES de Estado Interno**

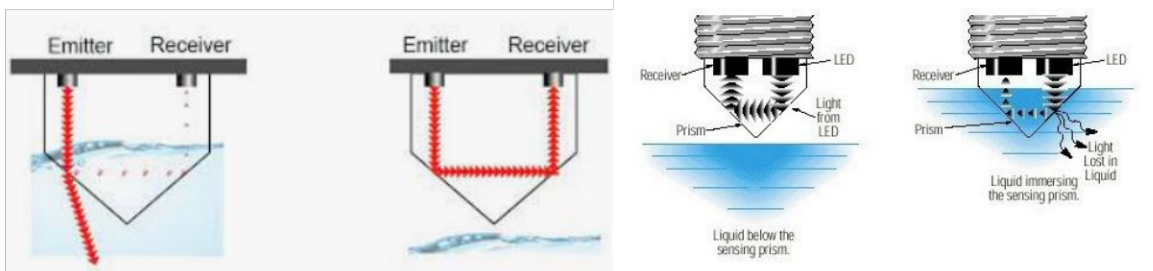
Permiten determinar el consumo de energía del robot, posible inundación, la temperatura interna del robot

MEDICIÓN CONSUMO ELÉCTRICO. Voltímetros y amperímetros. Medición de corriente por efecto Hall.

DETECTOR DE INUNDACIÓN. Hay 3 tipos de sensores

de inundación: de humedad, conductividad y óptico.

El sensor óptico es el más práctico, ya que el de humedad reacciona con retardo y el de conductividad está expuesto al ruido eléctrico. El detector óptico se basa en la colocación de un prisma con un índice de refracción similar al del agua en la parte inferior interna. Su funcionamiento consiste en emitir una señal óptica mediante un led, y se detecta si hay reflexión o no dentro del prisma.



MODELADO DE UN ROBOT SUBMARINO

Para el modelado cinemático se necesita conocer y definir el Marco de Referencia. Para describir los movimientos cinemáticos, es decir, las ecuaciones que relacionan los diferentes tipos de coordenadas utilizadas para expresar la posición y velocidad del robot.

Marco de referencia inercial NED. Este marco está ubicado sobre la superficie de la tierra y su nombre indica las siglas en inglés de Norte-Este-Abajo (*North-East-Down*). En este marco el eje x apunta hacia el norte, el eje y apunta hacia el este, y el eje z apunta hacia abajo y es normal a la superficie de la Tierra. De esta forma el plano $x - y$ es tangente en la superficie de la tierra. En este trabajo se refiere a este marco simplemente por N .

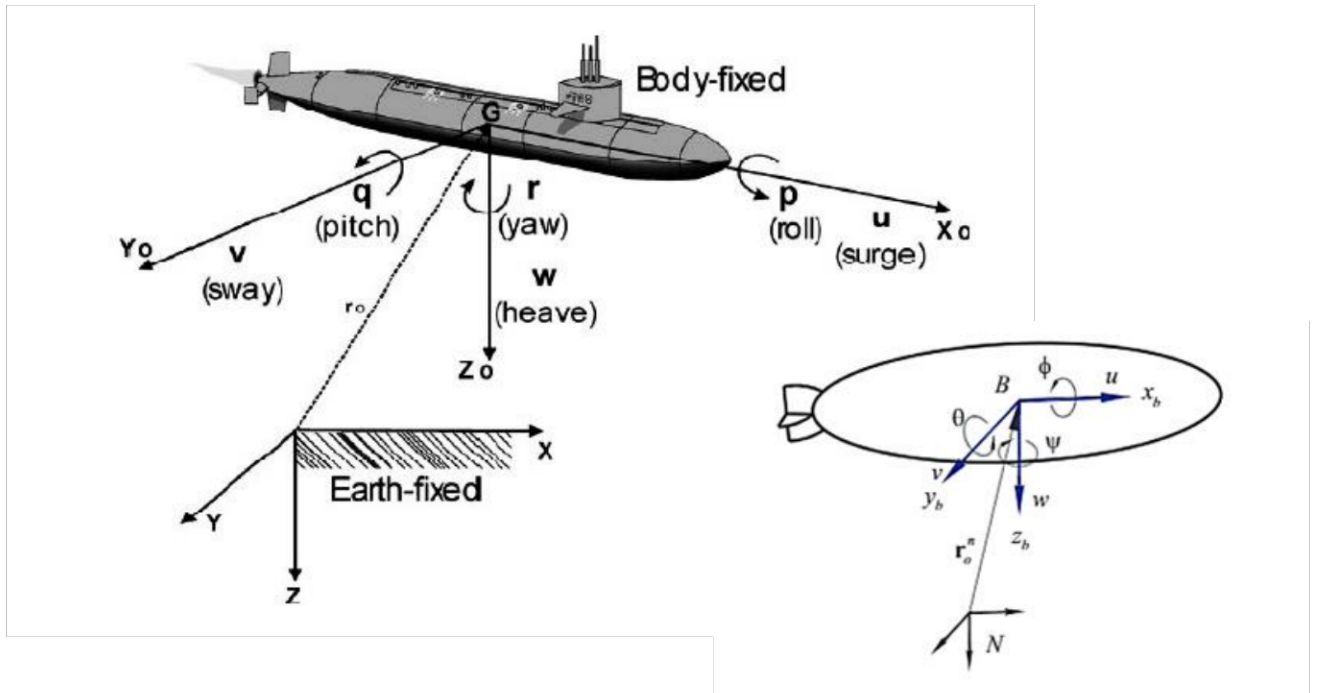
Marco de referencia del cuerpo B . Este marco de referencia está fijo al cuerpo del robot (*Body*). El origen O de este marco de referencia generalmente se hace coincidir con el centro de gravedad del cuerpo, cuando este se encuentra en el plano principal de simetría, o en algún otro punto conveniente si este no es el caso. Los ejes de este marco se eligen de tal forma que coincidan con los ejes principales de inercia, siendo x_b el eje longitudinal (que va de atrás hacia adelante), y_b el eje transversal (que va de un lado al otro), y z_b que va dirigido hacia abajo.

En navegación marítima y en robótica submarina existe la convención de la SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) para expresar la posición, orientación del vehículo y las fuerzas que se ejercen sobre él.

En la tabla 3 se muestran los nombres de los movimientos en inglés y español de vehículos marinos, la notación para posición, velocidad y fuerza.

Movimiento	Nombre		Posición	Velocidad	Fuerza
	Español	Inglés			
Traslación en x	Avance	<i>Surge</i>	x	u	X
Traslación en y	Desvío	<i>Sway</i>	y	v	Y
Traslación en z	M. Vertical	<i>Heave</i>	z	w	Z
Rotación en x	Alabeo	<i>Roll</i>	ϕ	p	K
Rotación en y	Cabeceo	<i>Pitch</i>	θ	q	M
Rotación en z	Guiñada	<i>Yaw</i>	ψ	r	N

En la figura se puede visualizar esta notación.



Para representar la posición del vehículo con respecto al marco inercial N se tiene el vector:

$$\eta = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_o^n \\ \Theta \end{bmatrix}$$

donde $\mathbf{r}_o^n = [x \ y \ z]^T$ representa la posición del marco de referencia del cuerpo B con respecto al marco N , mientras que Θ es un vector de parámetros que permiten definir la orientación relativa entre estos dos marcos de referencia. En este caso, los parámetros de orientación pueden ser los ángulos de Euler ó el cuaternión de los parámetros de Euler \mathbf{p}_b .

La velocidad del vehículo se representa por el vector:

$$\nu = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_o^b \\ \omega_b^b \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

donde $\mathbf{v}_o^b = [u \ v \ w]^T$ es la velocidad lineal del vehículo medido en coordenadas

del marco del cuerpo B , mientras que $\omega_b^b = [p \ q \ r]^T$ representa la velocidad angular del cuerpo con respecto al marco inercial medido en el marco de referencia del cuerpo B . Estas velocidades también se suelen denotar por los vectores $\nu_1 = v_o^b$ y $\nu_2 = \omega_b^b$.

Para describir las fuerzas a las que esta sujeto el vehículo se utiliza la notación :

$$\tau = \begin{bmatrix} f_o^b \\ n_o^b \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

donde $f_o^b = [X \ Y \ Z]^T$ y $n_o^b = [K \ M \ N]^T$ son los vectores de fuerza y momento ejercidos sobre el cuerpo medidos en el marco de referencia del cuerpo B .

En las siguientes secciones se presenta un revisión breve a la formulación presentada en (Fossen, 2002) sobre el modelado de cuerpos sumergidos.

MODELO CINEMATICO DEL ROBOT SUBMARINO

3.2.1. Matriz de Rotación

Las matrices de rotación son el metodo más extendido para la descripción de orientaciones, debido principalmente a la comodidad que proporciona el uso del algebra matricial. Estas matrices describen la orientación mutua entre dos sistemas coordenados; sus vectores columna son los cosenos directores de los ejes del sistema coordenado del cuerpo, con respecto al sistema coordenado inercial.

Dado un vector r^b expresado en coordenadas del marco B , entonces ese mismo vector, expresado en coordenadas del marco N es dado por: $r^a = R_b^a r^b$.

Sean A , B y C tres marcos coordenados. Si R_b^a es la matriz de rotación de B a A y R_c^b es la matriz de rotación de C a B , entonces la matriz de rotación de C a A es dada por: $R_c^a = R_b^a R_c^b$ que define la regla de composición para rotaciones. Finalmente, se denomina matriz de rotación elemental a la matriz de rotación que representa una rotación alrededor de uno de los ejes del marco de referencia.

3.2.2. Ángulos de Euler

De acuerdo a L. Euler, cualesquiera dos marcos coordenados ortonormales independientes (con un origen común) pueden ser relacionados por una sucesión de no más de tres rotaciones alrededor de los ejes coordenados. Esto significa que si se conoce la secuencia de ejes a rotar, se necesitan sólo tres ángulos de Euler para definir completamente la rotación total.

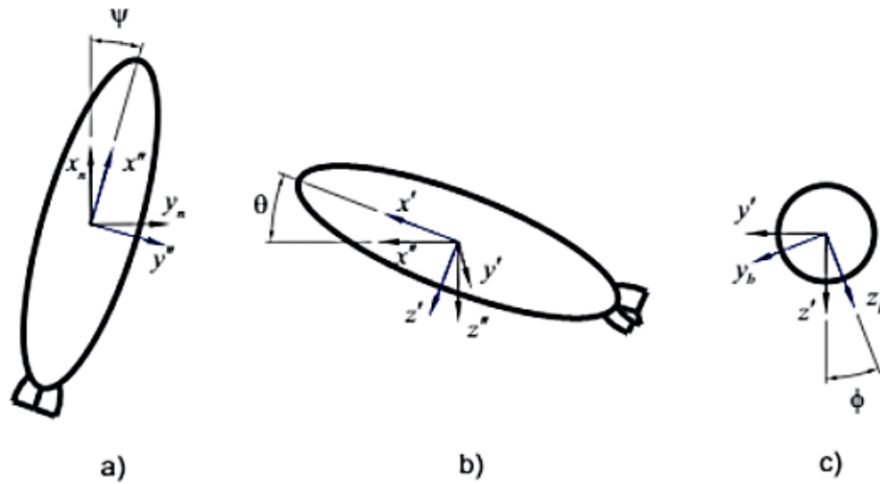


Figura 3.2: Notación en robótica submarina.

Dada una sucesión de ángulos de Euler, es posible encontrar la matriz de rotación correspondiente. La convención utilizada en robótica submarina para los ángulos de Euler consiste de la siguiente sucesión:

- Rotación del marco de referencia de un ángulo ψ alrededor del eje z para obtener el marco B'' .
- Rotación del marco de referencia de un ángulo θ alrededor del eje y para obtener el marco B' .
- Rotación del marco de referencia de un ángulo ϕ alrededor del eje x para obtener el marco B .

De esta forma:

$$\mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \mathbf{R}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \mathbf{R}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $s \cdot = \sin(\cdot)$ y $c \cdot = \cos(\cdot)$.

El orden de estas rotaciones no es arbitrario. Estas rotaciones se llevan a cabo desde el marco de referencia N al marco B . Esta matriz se denota por $\mathbf{R}_n^b = \mathbf{R}_b^n^T$. La matriz transpuesta implica que el mismo resultado se obtiene de transformar un vector del marco de referencia B al marco N , invirtiendo el orden de rotación. Esta secuencia de rotaciones es matemáticamente equivalente a:

$$\mathbf{R}_b^n = \mathbf{R}_{z,\psi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\phi}$$

Realizando esta operación se obtiene:

$$\mathbf{R}_b^n = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Para realizar la operación inversa, es decir determinar los ángulos de euler una vez conocida la matriz de rotación, se pueden derivar las siguientes expresiones:

$$\phi = \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \quad (3.5)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(r_{31}) = -\tan^{-1} \left(\frac{r_{31}}{\sqrt{1 - r_{31}^2}} \right) \quad (3.6)$$

$$\psi = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \quad (3.7)$$

en donde r_{ij} denota el elemento (i, j) de la matriz de rotación \mathbf{R}_b^n , y $\text{atan2}(y, x)$ es la función arco tangente de dos argumentos reales x, y , y satisface que $\frac{\pi}{2} \leq \text{atan2} \leq \frac{\pi}{2}$.

Transformación de Velocidades

La transformación que relaciona el vector de velocidad lineal en un marco de referencia inercial a al marco de referencia del marco de referencia del cuerpo puede se expresada de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{r}}_o^b = \mathbf{R}_b^n \mathbf{v}_o^b \quad (3.8)$$

Por otro lado, el vector de velocidad angular del cuerpo ω_b^b y el vector de velocidad de los ángulos de Euler están relacionados mediante una matriz de transformación \mathbf{T}_Θ como se muestra a continuación:

$$\dot{\Theta} = \mathbf{T}_\Theta \omega_b^b \quad (3.9)$$

donde \mathbf{T}_Θ esta dada por:

$$\mathbf{T}_\Theta = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

y $t \cdot = \tan(\cdot)$.

Las expresiones anteriores se pueden resumir de la siguiente manera:

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}\nu \quad (3.11)$$

donde:

$$\mathbf{J}(\nu) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_\Theta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

donde $\dot{\eta} = \frac{d(\eta)}{dt}$.

3.2.3. Parámetros de Euler

Otro alternativa para representar la orientación mediante parámetros de Euler. La principal motivación de usar estos parámetros es evitar las singularidades que sufre la representación mediante los ángulos de Euler.

Un cuaternión esta compuesto de cuatro parámetros:

$$\mathbf{p} = [e_0 \ e_1 \ e_2 \ e_3]^T \quad (3.13)$$

que satisfacen una restricción de norma unitaria,

$$\mathbf{p}^T \mathbf{p} = 1.$$

La expresión de la matriz de rotación en términos de los parámetros de Euler es la siguiente:

$$\mathbf{R}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 - 2(e_2^2 + e_3^2) & 2(e_1e_2 - e_0e_3) & 2(e_1e_3 + e_0e_2) \\ 2(e_1e_2 + e_0e_3) & 1 - 2(e_1^2 + e_3^2) & 2(e_2e_3 - e_0e_1) \\ 2(e_1e_3 - e_0e_2) & 2(e_2e_3 + e_0e_1) & 1 - 2(e_1^2 + e_2^2) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

En forma compacta, se tiene:

$$\mathbf{R} = (e_0^2 - \mathbf{e}^T \mathbf{e}) \mathbf{I}_3 + 2e_0 \mathbf{S}(\mathbf{e}) + 2\mathbf{e}\mathbf{e}^T,$$

o equivalentemente

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_3 + 2e_0\mathbf{S}(\mathbf{e}) + 2\mathbf{S}(\mathbf{e})^2$$

donde $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ es un subvector de \mathbf{p} y $\mathbf{S}(\cdot)$ es el operador matricial del producto cruz. Dado el vector \mathbf{e} se tiene que

$$\mathbf{S}(\mathbf{e}) = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Transformación de Velocidades

Para realizar la transformación de velocidades lineales se realiza la misma operación que en el caso de los ángulos de Euler, simplemente mediante el uso de la matriz de rotación.

La transformación de la velocidad angular se puede derivar sustituyendo la expresión (3.14) en la ecuación diferencial $\dot{\mathbf{R}}_b^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_b^b)$. Mediante algunas operaciones se tiene:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{T}_p \boldsymbol{\omega}_b^b \quad (3.16)$$

donde:

$$\mathbf{T}_p(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -e_1 & -e_2 & -e_3 \\ e_0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & e_0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & e_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Las expresiones anteriores se pueden resumir de la siguiente manera:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}\boldsymbol{\nu} \quad (3.18)$$

donde:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_p \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

En este caso $\dot{\boldsymbol{\eta}} = [\dot{\mathbf{r}}_o^n \ \dot{\mathbf{q}}]^T$.

MODELO DINAMICO DE ROBOT SUBMARINOS

El modelo dinámico de un robot submarino describe la relación existente entre los movimientos del robot y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. Se presenta un revisión breve a la formulación presentada en (Fossen, 2002) sobre el modelado de cuerpos sumergidos. De esta manera, se pueden calcular las fuerzas externas necesarias para que el robot se mueva de una forma determinada, ó por el contrario, se puede determinar el movimiento generado por las fuerzas externas a las que el robot esta sujeto.

En este capítulo se presentaran las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler para cuerpos sumergidos en el agua. Los cuerpos sumergidos esta sujetos a diferentes tipos de fuerzas. Estas fuerzas son principalmente las fuerzas inerciales, las hidrodinámicas y las fuerzas de restitución.

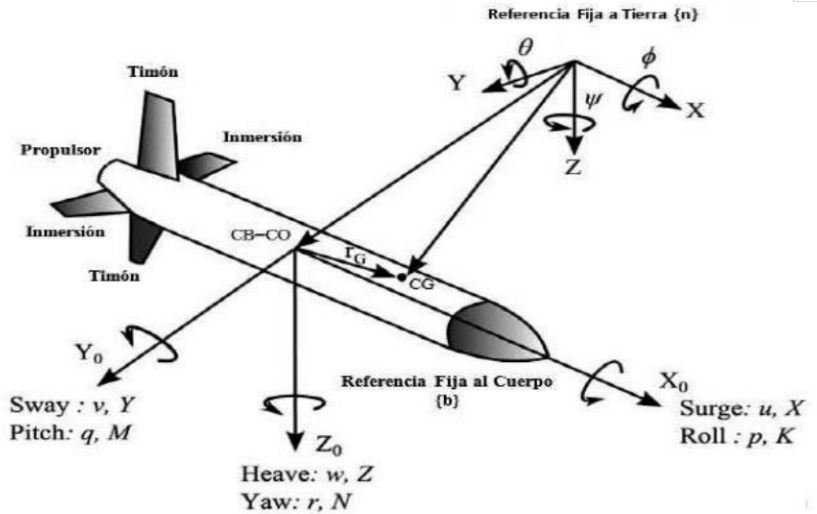
El modelo dinámico de un robot submarino se puede escribir en su forma compacta como se muestra a continuación:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g}_o + \mathbf{w} \quad (3.20)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t \quad (3.21)$$

donde la matriz \mathbf{M} contiene los elementos de la matriz de inercia y la matriz de masa añadida (el concepto de la masa añadida se presentara posteriormente); por su parte la matriz \mathbf{C} consiste de la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis del cuerpo rígido y de la masa añadida; la matriz de \mathbf{D} es la matriz de fuerzas viscosas; y el vector $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ representa las fuerzas de restitución (las cuales están compuestas por la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación).

Por otro lado el vector $\boldsymbol{\tau}$ representa las fuerzas que ejercen los impulsores (o cualquier otro elemento generador de fuerza) sobre el robot submarino. Los elementos de la matriz de control \mathbf{B}_t dependen de la configuración de cada robot, sus superficies de control, el numero de impulsores, y la ubicación y orientación de los impulsores. El vector \mathbf{u}_t esta compuesto de las fuerzas que se generan en cada impulsor. Por otra parte, el vector \mathbf{g}_o representa la fuerza generada por el control de lastre. El vector \mathbf{w} representa las perturbaciones del ambiente (como lo son, las olas, el viento y las corrientes marinas).



3.3.1. Fuerzas Inerciales

Las ecuaciones de Newton-Euler para un cuerpo rígido son las siguientes:

$$\mathbf{f}_c^b = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}_c^b) \quad (3.22)$$

$$\mathbf{n}_c^b = \frac{d}{dt}(\mathbf{I}_c\boldsymbol{\omega}_b^b) \quad (3.23)$$

donde \mathbf{f}_c^b y \mathbf{n}_c^b son la fuerza y el torque en el centro de masa del cuerpo; m e \mathbf{I} son la masa y la matriz de inercia del cuerpo, respectivamente. En este caso la matriz de masa esta dada en el marco de referencia del cuerpo. Los vectores \mathbf{v}_c^b y $\boldsymbol{\omega}_b^b$ representan la velocidad lineal y angular del cuerpo con respecto al marco de referencia inercial N pero medidas en el marco de referencia del cuerpo B .

Para robots submarinos, es deseable derivar las ecuaciones de movimiento dada una posición arbitraria del origen O del marco de referencia del cuerpo B . Esto se debe a que algunas propiedades hidrodinámicas se pueden calcular con mayor facilidad en puntos que pueden no coincidir con el centro de masa del robot.

La velocidad lineal del centro de masa con respecto al marco N medido en el marco de referencia del cuerpo B se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathbf{v}_c^b = \mathbf{v}_o^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b \quad (3.24)$$

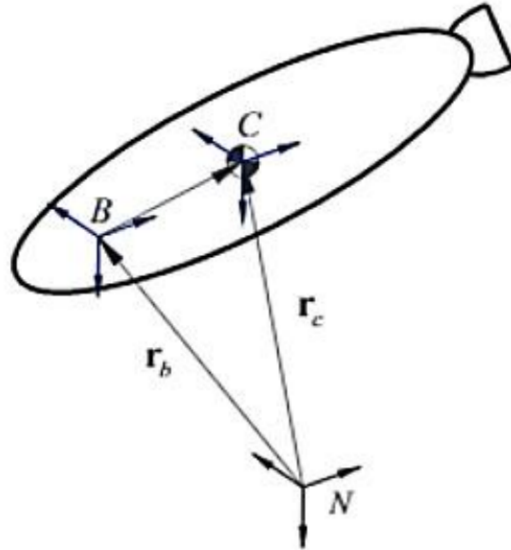


Figura 3.3: Marcos de referencia en un robot submarino.

donde \mathbf{r}_g^b es la posición del centro de masa con respecto al origen del marco B . Para determinar la aceleración del centro de masa con respecto al marco de referencia N se considera primero que $\mathbf{v}_c^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{v}_c^b = \mathbf{R}_b^n (\mathbf{v}_o^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b)$. Derivando \mathbf{v}_c^n con respecto al tiempo se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{\mathbf{v}}_c^n = \mathbf{R}_b^n [\dot{\mathbf{v}}_o^b + \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^b \times \mathbf{r}_g^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{v}_o^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times (\boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b)] \quad (3.25)$$

Por lo tanto, sustituyendo el valor de la derivada (3.25) en la ecuación (3.22), y dado que $\mathbf{f}_o^b = \mathbf{f}_c^b$ para movimientos traslacionales obtenemos la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}_o^b = m[\dot{\mathbf{v}}_o^b + \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^b \times \mathbf{r}_g^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{v}_o^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times (\boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b)] \quad (3.26)$$

lo cual nos permite calcular la fuerza en el origen del marco de referencia del cuerpo, es decir O .

Por otra parte el momento angular con respecto al punto O y al punto C esta dado por las siguientes expresiones $\mathbf{h}_o^b = \mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{v}_o^b$ y $\mathbf{h}_c^b = \mathbf{h}_o^b - m \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{v}_c^b$

Considerando que $\mathbf{h}_c^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{h}_c^b$, la derivada temporal del momentum angular con respecto al punto C es la siguiente:

$$\dot{\mathbf{h}}_c^n = \mathbf{R}_b^n [\mathbf{I}_o \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\dot{\mathbf{v}}_o^b - \dot{\mathbf{v}}_c^b) + \boldsymbol{\omega}_b^b \times (\mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\mathbf{v}_o^b - \mathbf{v}_c^b))].$$

Por otro lado, el momento \mathbf{n}_c^n es igual a $\mathbf{n}_c^n = \dot{\mathbf{h}}_c^n$ y $\mathbf{n}_c^n = \mathbf{R}_b^n (\mathbf{m}_o^b - \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{f}_c^b)$ siendo en este caso $\mathbf{f}_c^b = m(\dot{\mathbf{v}}_c^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{v}_c^b)$. Igualando las expresiones de \mathbf{n}_c^n y realizando operaciones algebraicas se obtiene finalmente la ecuación del momento en el origen del marco B :

$$\mathbf{n}_o^b = \mathbf{I}_o \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^b + \boldsymbol{\omega}_b^b \times (\mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}_b^b) + m \mathbf{r}_g^b \times \dot{\mathbf{v}}_o^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\boldsymbol{\omega}_b^b \times \mathbf{v}_o^b) \quad (3.27)$$

Las ecuaciones (3.26) y (3.27) se pueden escribir en forma matricial, como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_o^b \\ \mathbf{n}_o^b \end{bmatrix} = \mathbf{M}_R \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_o^b \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^b \end{bmatrix} + \mathbf{C}_R(\mathbf{v}_o^b, \boldsymbol{\omega}_b^b) \begin{bmatrix} \mathbf{v}_o^b \\ \boldsymbol{\omega}_b^b \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

donde \mathbf{M}_R es la matriz de masas del cuerpo rígido, y $\mathbf{C}_R(\nu)$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis. La matriz de masas esta dada de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} m \mathbf{I}_3 & -m \mathbf{S}(\mathbf{r}_g^b) \\ m \mathbf{S}(\mathbf{r}_g^b) & \mathbf{I}_O \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis puede adoptar diferentes formas. En este caso adoptamos una que hace que esta matriz sea antisimétrica, es decir $\mathbf{C}_R(\nu) = -\mathbf{C}_R(\nu)^T$. Por lo tanto, esta matriz esta dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{C}_R(\nu) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R11}\nu_1 + \mathbf{M}_{R12}\nu_2) \\ -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R11}\nu_1 + \mathbf{M}_{R12}\nu_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R21}\nu_1 + \mathbf{M}_{R22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

3.3.2. Fuerzas Hidrodinámicas

Los fuerzas hidrodinámicas que afectan un cuerpo sumergido son bastantes complejas ya que dependen de muchas variables como son las características del fluido, la temperatura, la presión y la forma geométrica del cuerpo entre otras. Las fuerzas hidrodinámicas son la fuerzas de masa añadida y las fuerzas viscosas.

3.3.3. Masa Añadida

La masa añadida es una fuerza que se opone al movimiento del cuerpo en el fluido y depende de la aceleración del cuerpo, como también puede serlo de la velocidad. La masa añadida se suele asociar con la cantidad de fluido que se encuentra alrededor del cuerpo, y que debe acelerarse cuando el cuerpo también lo hace. Muchas veces se malinterpreta la masa añadida como una cantidad de fluido a agregar a la masa del cuerpo, sin embargo, la masa añadida es algo más complejo. A diferencia de la masa de cuerpo rígido, la masa añadida no siempre cumple con la propiedad de ser constante y simétrica, como tampoco es siempre diagonal, incluso se han reportado casos en donde posee elementos negativos. La manera más fiable de medir la masa añadida es a través de la experimentación. La forma como se hace es acelerar el cuerpo en dirección de los ejes y medir la variación en la fuerza requerida.

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Por otro lado a la matriz de masa añadida la podemos expresar en términos de 4 submatrices:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{A11} & \mathbf{M}_{A12} \\ \mathbf{M}_{A21} & \mathbf{M}_{A22} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis de la masa añadida puede adoptar diferentes formas. Al igual que en el caso de $\mathbf{C}_R(\boldsymbol{\nu})$, adoptamos una que hace que esta matriz sea antisimétrica, es decir $\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = -\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})^T$. Por lo tanto, esta matriz esta dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A11}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{M}_{A12}\boldsymbol{\nu}_2) \\ -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A11}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{M}_{A12}\boldsymbol{\nu}_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A21}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{M}_{A22}\boldsymbol{\nu}_2) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Masa añadida de una esferoide prolato

Imlay derivó las expresiones de la masa añadida para un elipsoide y un esferoide prolato. A continuación se presentan las ecuaciones de la masa añadida para un esferoide prolato. Estas expresiones son función únicamente de las características geométricas del esferoide.

Considérese un elipsoide totalmente sumergido descrito como $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$, donde a , b , c son los semi ejes del elipsoide. Un esferoide prolato se obtiene de $b = c$ y $a > b$. La masa añadida esta dada de la siguiente manera:

$$X_{\dot{u}} = -\frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0} m_s \quad (3.34)$$

$$Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} = -\frac{\beta_0}{2 - \beta_0} m_s \quad (3.35)$$

$$K_{\dot{p}} = 0 \quad (3.36)$$

$$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} = -\frac{1}{5} \frac{(b^2 - a^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(b^2 - a^2) + (b^2 + a^2)(\beta_0 - \alpha_0)} m_s \quad (3.37)$$

donde el parámetro m_s es:

$$m_s = \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \quad (3.38)$$

y las constantes α_0 y β_0 puede calcularse como:

$$\alpha_0 = \frac{2(1 - e^2)}{e^3} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{1 + e}{1 - e} - e \right) \quad (3.39)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1 - e^2}{2e^3} \ln \frac{1 + e}{1 - e} \quad (3.40)$$

siendo e la excentricidad:

$$e^2 = 1 - (b/a)^2 \quad (3.41)$$

Estas expresiones pueden resultar útiles para calcular un estimado de la masa añadida de un robot submarino con forma de esferoide prolato (como lo son algunos AUVs).

3.3.3.1. Fuerzas Viscosas

Estas fuerzas son el resultado de la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el cuerpo. Se suelen clasificar según el efecto sobre el cuerpo en: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación. Las fuerzas de arrastre se oponen al movimiento y actúan en dirección opuesta, mientras que las fuerzas de sustentación son perpendiculares al movimiento relativo del cuerpo sobre el fluido. Al igual que la masa añadida, la única forma de tener un conocimiento fiable de las magnitudes de dichas fuerzas es a través de la experimentación, con lo cual se obtendrá una matriz no lineal y compleja que varía en función de la velocidad del cuerpo.

Las fuerzas de amortiguación viscosa se pueden modelar de la siguiente manera:

$$f(u) = -\frac{1}{2}\rho_a C_D A_t |u|u \quad (3.42)$$

Donde u es la velocidad del vehículo, A es la area que se proyecta en un plano ortogonal a la dirección de la velocidad, C_D es el coeficiente de arrastre basado en en una area representativa, y ρ_a es la densidad del agua. Esta expresión se reconoce como una lo los términos de la ecuaciones de morrison. El coeficiente de arrastre $CD(Rn)$ es una función de el numero de Reynolds: $Rn = UD/\nu$ Donde D es la longitud característica del cuerpo y μ es el coeficiente viscosidad cinemática ($\nu=1.56 \cdot 10^{-6}$ para agua salada a 5° C con salinidad de 3.5

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} |\nu| \mathbf{D}_{n1} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n2} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n3} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n4} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n5} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n6} \nu \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Donde $|\nu| = [|u|, |v|, |w|, |p|, |q|, |r|]^T$ y \mathbf{D}_{ni} son matrices cuadradas de dimensión 6 que dependen de ρ_a , C_D y A_t . Los diferentes términos de amortiguación contribuyen a las amortiguaciones lineales y cuadráticas. Sin embargo, es generalmente difícil de separar esos efectos. En muchos casos es conveniente escribir el amortiguamiento hidrodinámico total como:

$$\mathbf{D}(\nu) = \mathbf{D}_l + \mathbf{D}_n \quad (3.44)$$

Donde \mathbf{D}_l es la matriz de amortiguamiento lineal y \mathbf{D}_n es la matriz de amortiguación no lineal. La matriz \mathbf{D} tiene las siguientes propiedades: es real, no simétrica y estrictamente positiva.

En general, el amortiguamiento de un vehículo submarino moviéndose en el espacio tridimensional a altas velocidades es altamente no lineal y acoplado. Sin embargo, una aproximación a groso modo es asumir que el robot realiza un movimiento desacoplado. Esto sugiere que la estructura de la matriz \mathbf{D} con solo términos lineales o cuadráticos en la diagonal:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} = & -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ & -\text{diag}\{X_{|u|u}|u|, Y_{|v|v}|v|, Z_{|w|w}|w|, K_{|p|p}|p|, M_{|q|q}|q|, N_{|r|r}|r|\} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Es necesario hacer notar que esta expresión no es válida cuando se realizan movimientos combinados. Particularmente en el caso de los términos cuadráticos ya que los resultados arrojados serian conceptualmente erróneos desde el punto de vista matemático.

Para obtener los parámetros hidrodinámicos de un robot, la mejor manera es la experimentación. No obstante, es posible encontrar software especializado como el PowerFlow (Powerflow,2012) que puede ser útil para determinar estos parámetros. Además, también se han realizado trabajos para encontrar expresiones matemáticas que determinen estos parámetros a partir de la geometría del robot

3.3.4. Fuerzas de Restitución

Además de las fuerzas hidrodinámicas, los vehículos submarinos son afectados por la gravedad y las fuerza de flotación. Estas fuerzas son llamadas fuerzas de restitución.

La fuerza gravitacional \mathbf{f}_g^b actúan sobre el centro de gravedad el cual esta definido por el vector $\mathbf{r}_g^b = [x_g \ y_g \ z_g]^T$. De manera similar, la fuerza de flotación \mathbf{f}_{by}^b actuan sobre el centro de flotación definido por el vector $\mathbf{r}_{by}^b = [x_{by} \ y_{by} \ z_{by}]^T$. El peso de un cuerpo sumergido en el agua y la fuerza de flotación están definidos de la siguiente manera:

$$W = mg \quad (3.46)$$

$$B = \rho_a g V \quad (3.47)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y V es el volumen desplazado por el robot.

Por lo tanto:

$$\mathbf{f}_g^n = [0 \ 0 \ W]^T \quad (3.48)$$

y

$$\mathbf{f}_{by}^n = -[0 \ 0 \ B]^T \quad (3.49)$$

Las fuerzas de gravedad y flotación se pueden transformar al marco de referencia del cuerpo simplemente multiplicando por la inversa de matriz de rotación \mathbf{R}_b^n , i.e. $\mathbf{f}_g^b = \mathbf{R}_b^n^{-1} \mathbf{f}_g^n$ y $\mathbf{f}_{by}^b = \mathbf{R}_b^n^{-1} \mathbf{f}_{by}^n$.

Por lo tanto la fuerza y el momento de restitución en el marco de referencia del cuerpo esta dado de la siguiente manera:

$$\mathbf{g}(\nu) = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_g^b + \mathbf{f}_{by}^b \\ \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{f}_g^b + \mathbf{r}_{by}^b \times \mathbf{f}_{by}^b \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

sustituyendo los elementos que cada vector, se tiene los siguientes valores para el vector de fuerzas de restitución:

$$\mathbf{g}(\nu) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_{by} B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_{by} B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_g W - z_{by} B) \sin \theta + (x_g W - x_{by} B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_g W - x_{by} B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_{by} B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Una herramienta útil (y didáctica) para el modelado de robots submarinos es el GNC Toolbox para Matlab_ desarrollada por Fossen (2002).

CONTROL DE ROBOT SUBMARINOS

Se han propuestos varios métodos y leyes de control para robots submarinos. Algunos conceptos relativos a los componentes de un sistema de control de robots submarinos son necesarios establecer. En la Bibliografía:

En (Fossen, 2002) y (Antonelli et al., 2008) se presenta el concepto del Sistema de Control de la Misión (MCS por *Mission Control System*). El MCS es el conjunto de programas responsables de que se lleve a cabo la misión deseada. Un MCS está usualmente equipado con una interfaz gráfica que permite al operador comandar diferentes tareas que componen la misión. El MCS contiene los elementos de Guiado, Control y Navegación del robot. Las tareas de la misión son generalmente concurrentes y su manejo depende del estado del vehículo y de las condiciones ambientales; por lo tanto el MCS maneja las tareas, eventualmente suprimiéndolas y definiendo su secuencia (modificando y priorizando). El MCS está compuesto por los siguientes sistemas:

MCS. Programa de Control complejo. Guiado, Control y Navegación del Robot

Sistema de Guiado. El sistema de guiado genera las trayectorias que se desea que el robot siga durante una misión. Esta información (la posición, velocidad y aceleración del robot) es enviada al Sistema de Control el cual tratará de alcanzar las referencias deseadas. El sistema de guiado tiene como entradas los Puntos Guía definidos por el usuario, e información proveniente del sistema de Navegación. Además, puede recibir información sobre la situación del ambiente (e.g. corrientes marinas), de la topografía del fondo marino, y datos provenientes de un sonar para la detección de obstáculos. No obstante, actualmente algunos AUV tienen un módulo de planificación dinámica que les permite replanificar durante la misión y pasarle al módulo de guiado puntos guía que no fueron definidos previamente (Acosta et al., 2008).

Sistema de Control. El sistema de control es el encargado de calcular las fuerzas necesarias que debe generar el sistema de propulsión para que el robot alcance las referencias deseadas. La construcción del sistema de control involucra el diseño y la sintonización de las Leyes de Control que regularán los movimientos del robot. El sistema de control recibe información la posición, velocidad y aceleración deseada y el estado actual de estas variables medidas a través de los sensores del robot. Este sistema puede consistir de leyes de control clásico, control no lineal, control inteligente, sistemas basados en comportamiento (*behavior-based*), etc.

Sistema de Navegación. El sistema de navegación recibe la información de los sensores de posición, velocidad y aceleración del robot submarino. Mediante un Observador u otros algoritmos procesa esta información y posteriormente la envía al Sistema de Guiado y al Sistema de Control.

En (Valavanis et al., 1997) se presenta una clasificación de los tipos de MSCs de AUVs en la que se identificaron 4 arquitecturas de control: Jerárquica, Distribuida, Por Capas (*subsumption*) e Híbrida. Por otro lado en (Ridao et al., 2000), se hace una clasificación de arquitecturas de control en la que se considera los aspectos de inteligencia artificial e interacción con el medio ambiente. En este último trabajo la clasificación de las arquitecturas de control quedaría de la siguiente manera: Deliberativa, Reactiva e Híbrida. Se considera que esta última clasificación es más general e incluye a la hecha en (Valavanis et al., 1997). De acuerdo a (Ridao et al., 2000) se describe brevemente estas arquitecturas:

Arquitectura Deliberativa. Esta arquitectura, del tipo piramidal, divide el sistema en niveles de mayor a menor responsabilidad. Los niveles más altos se encargan de la misión que debe realizar el robot, y los niveles más bajos resuelven problemas particulares. La comunicación sólo es posible entre dos capas adyacentes, la de mayor capa envía comandos al nivel más bajo subsiguiente. La arquitectura deliberativa se basa en el planeamiento y un modelo del mundo. Esto le permite razonar y hacer predicciones acerca del medio ambiente. El análisis de los datos obtenidos de los sensores identifica el mundo real y se usa para planear nuevas acciones.

Arquitectura Reactiva. La arquitectura reactiva o basada en comportamiento (*behavior based*) usa una estructura paralela, donde todos los módulos del sistema pueden comunicarse directamente entre ellos, sin necesidad de la supervisión de un nivel intermediario superior. El comportamiento obtenido del robot está basado en una secuencia de fases con un conjunto de conductas activas que reaccionan continuamente ante las situaciones detectadas. El comportamiento global surge de la combinación de los elementos activos, que siguen el principio de detección - reacción, y que pueden interactuar con medios dinámicos. Debido a que las múltiples reacciones podrían cambiar la perspectiva global de la misión, a veces el robot podría comportarse de una manera no previsible. Para evitar esto, se establece un sistema de arbitraje de prioridades, para que en el momento de algún conflicto, se resuelva la situación y se retome la meta establecida.

Arquitectura Híbrida. Es una arquitectura que combina a las arquitecturas deliberativa y reactiva, en donde se toman las ventajas de cada una. El sistema se divide por lo general en tres niveles: la capa deliberativa, la cual está basada en la planificación; la capa de ejecución de control, y la capa funcional reactiva. Estas capas usan diferentes niveles de abstracción. El nivel alto utiliza la arquitectura jerárquica para implementar las estrategias y la funcionalidad del sistema. El nivel más bajo utiliza la arquitectura reactiva, para controlar el hardware del subsistema según la interacción con el medio ambiente, pero controladas por la capa de ejecución de control. La capa reactiva consiste de algunos módulos con autonomía propia que pueden ejecutar tareas de forma independiente. En una situación de emergencia, puede hacerse cambios, para que el nivel más alto asuma el control.

SISTEMAS DE CONTROL. ROBOTICA SUBMARINA

4.1. Control Clásico

Para controlar robots submarinos se pueden emplear las distintas técnicas de control que previamente se han propuesto para otros sistemas. Este es el caso de los controladores en lazo cerrado que realimentan las señales medidas por los sensores del robot. En el caso de un controlador PID, la ley de control se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_{PID} = J(v)^T \left[K_p \tilde{\eta} + K_d \dot{\tilde{\eta}} + K_i \int \tilde{\eta}(\sigma) d\sigma \right] \quad (40)$$

donde $\tilde{\eta} = \eta_d - \eta$ es el error entre la posición real y la deseada, K_p es la matriz de ganancias proporcionales, K_d ganancias derivativas, y K_i es la matriz de ganancias integrales. Por otro lado se ha propuesto también el controlador PID con realimentación de aceleración.

$$\tau_{PIDA} = J(v)^T \left[K_p \tilde{\eta} + K_d \dot{\tilde{\eta}} + K_i \int \tilde{\eta}(\sigma) d\sigma \right] - H \dot{v} \quad (41)$$

Donde la matriz H puede ser constante o dependiente de la frecuencia. El propósito de la realimentación de aceleración es que el sistema sea menos sensible a perturbaciones externas como lo pueden ser las corrientes marinas. En (Fossen, 2002) se explica este concepto.

Dada la estructura del modelo presentado en la ec. (20) se podrían extrapolar las distintas leyes de control que se han propuesto para robot manipuladores.

4.2. *Control No Lineal*

En (Yoerger and Slotine, 1985) se presentó un controlador en modos deslizantes para robots submarinos. Las ventajas de este tipo de controlador es que trabaja directamente con los términos no lineales, es altamente robusto a modelos imprecisos y a la presencia de perturbaciones que son difíciles de medir o estimar. En (Healey and Lienard, 1993) se diseñó un autopiloto basado en modos deslizantes para controlar la dirección, velocidad y profundidad de un vehículo submarino. En (Innocenti and Campa, 1999) se presenta la síntesis de dos controladores robustos (uno basado en modos deslizantes y otro basado en técnicas de desigualdades matriciales lineales, LMI) para robots submarinos.

Por otro lado, diversos autores han propuesto controladores adaptables, ya que pueden ser una solución al problema de determinar los parámetros hidrodinámicos del robot (es difícil obtener estos parámetros mediante formulaciones matemáticas, y por otro lado, determinarlos experimentalmente conlleva a un costo económico y de tiempo). En (Goheen and Jeffery, 1990) se presenta un par de autopilotos auto-sintonizables de múltiples entradas y múltiples salidas. En ese trabajo se presenta un controlador lineal cuadrático auto-sintonizable en línea, y por otro lado una ley de control basada en una aproximación de primer orden de la dinámica del sistema en lazo abierto con identificación recursiva en línea. En (Fossen and Sagatun, 1991) se presentan dos controladores para compensar las incertidumbres del modelo de un ROV, estos son: un controlador adaptable basado en pasividad, y un controlador híbrido (adaptativo y por modos deslizantes). En (Nie et al., 1998) se presentó un control adaptable para un robot que opera en aguas poco profundas.

4.3. *Control Inteligente*

En (Yuh, 1990) y (Yuh, 1994) se presentaron controladores basados en redes neuronales para robots submarinos. En (Yuh, 1994) el sistema de control consistía de una red neuronal y un algoritmo de aprendizaje. La red neuronal está compuesta por múltiples capas de neuronas. La capa de entrada recibe la posición y velocidad deseada, la posición y velocidad actual, y señales provenientes del algoritmo de aprendizaje. La salida de la red neuronal es la que controla al vehículo. El algoritmo de aprendizaje ajusta los valores de los parámetros de ponderación de las neuronas, en función del error existente entre el estado deseado y el real. En (van de Ven et al., 2005) se hace una revisión sobre diferentes trabajos en los cuales se ha aplicado redes neuronales al control de robots submarinos y se realiza una clasificación de las estrategias presentadas.

En (DeBitetto, 1995) se presenta el diseño de un controlador de lógica difusa para el control de profundidad de robots submarinos. Este tipo de controlador es poco sensible a la configuración del vehículo y su dinámica. Según los autores de ese

trabajo, los beneficios del uso de este tipo de controladores son: simplicidad, debido que no se requiere un modelo dinámico del sistema; la estrategia de control encaja mejor con los objetivos de control y las limitaciones; mediante el uso de reglas lingüísticas se puede tener una fácil comprensión y manipulación del controlador. En (Guo and Huang, 1996) se aplicaron algoritmos genéticos para sintonizar reglas para un controlador de lógica difusa. Se realizaron pruebas experimentales y se mostró cómo el controlador ajustado por el algoritmo genético mejoraba su desempeño. Por otro lado, en (Guo et al., 2003) se presentó la aplicación de un controlador en modos deslizantes con lógica difusa.

BIBLIOGRAFIA DE REFERENCIA

- [] Moreno. Saltaren. Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control
- [] Ezquiel Steven Moreno Cepeda. Diseño y Construcción de un vehículo con capacidad de transporte terrestre y acuático. Universidad de Colombia. 2017.
- [4]. First mariners. Archaeology.
<http://archive.archaeology.org/9805/newsbriefs/mariners.html>
- [] Manuel Velueta. Navegación autónoma de un vehículo acuático no tripulado dedicado a la exploración de zonas costeras. Master's thesis, Universidad Autónoma del Carmen, 2018.
- [] Saunders, Fenella. SilverBot by K'nex / The Amphibious Solar Vehicle by OWI Inc. / Space Wings by Mondo-tronics. s.l. : Discover, Dec de 1999.
- [] Manuel Velueta. Navegación autónoma de un vehículo acuático no tripulado dedicado a la exploración de zonas costeras. Master's thesis, Universidad Autónoma del Carmen, 2018.
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=-LabkzHSte0>
<https://www.youtube.com/watch?v=pc2R79q9ddo>
<https://www.youtube.com/watch?v=PuETglEQieU>
https://www.youtube.com/watch?v=9w4RMpCns_s
https://www.youtube.com/watch?v=9rf2o_HOJGE&t=847s
- [6] Water Car, Builders of the Most Fun Vehicle on the Planet. 2015.
<https://www.watercar.com/product/profile/775>.
- [7] Eduardo Rodriguez Canales. Sistema de Control para un vehículo acuático no tripulado. Perú. 2019.
- [16] FOSSEN, T. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Estados Unidos: Wiley.
- [] Richard Stone, Jeffrey K.Ball. *Automotive Engineering Fundamentals*. Warrendale : SAE international, 2004.
- [] Newfangled Solutions. url: <https://www.machsupport.com>, S.F.
- [17] Buoyancy. The Physics Hypertextbook. <http://physics.info/buoyancy/>
- [] Thor Inge Fossen. Nonlinear modelling and control of underwater vehicles. Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og elektroteknikk, 1991.
- [] mercurymarine. <https://www.mercurymarine.com/>. <https://www.mercurymarine.com>.
[En línea] 2017. <https://www.mercurymarine.com/es/lam/gauges-and-controls/steering/>.



ScienceDirect

Disponible en www.sciencedirect.com



Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11 (2014) 3–19

www.elsevier.es/RIAI

Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control.

Héctor A. Moreno^{ab*}, Roque Saltarén^b, Lisandro Puglisi^b, Isela Carrera^{bc}, Pedro Cárdenas^{bd}, César Álvarez^e

^a*Instituto Tecnológico Autónomo de México, Río Hondo No. 1 Col. Progreso Tizapán, 01080, México D.F., México.*

^b*Centro de Automática y Robótica, Universidad Politécnica de Madrid-CSIC, José Gutiérrez Abascal, 2. 28006, Madrid, España.*

^c*Tecnológico de Monterrey, ITESM-Campus Laguna, Paseo del Tecnológico, 751. 27250, Torreón, México.*

^d*Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 No. 26-28, Bogotá, Colombia.*

^e*Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Av. 16 con C. 67. 4011, Maracaibo, Venezuela.*

Referencias

- Acosta, G., Curti, H., Calvo, O., Rossi, S., 2008. Some issues on the design of a low-cost autonomous underwater vehicle with an intelligent dynamic mission planner for pipeline and cable tracking. In: Inzartsev, A. (Ed.), *Underwater Vehicles*. InTech, Ch. 1, pp. 1–19.
- Alvarez, C., 2008. Concepción y desarrollo de un vehículo submarino robótico de estructura paralela de geometría variable. Ph.D. thesis, Univesidad Politecnica de Madrid, Madrid, España.
- Alvarez, C., Saltaren, R., Aracil, R., García, C., 2009. Concepción, desarrollo y avances en el control de navegación de robots submarinos paralelos: el robot remo i. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 6 (3), 92–100.
- Amat, J., Escote, O., Frigola, M. and Giralt, X., Hernansanz, A., 2006. Milana: a lowcost glider used for building a map of barcelona sea bed. In: *Robotics and Automation in the Maritime Industries AUTOMAR*, Madrid, Spain. pp. 295–304.
- Anderson, J. M., Chabra, N. K., 2002. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna. *Integrative and Comparative Biology* 42 (1), 118–126.
- Antonelli, G., 2003. *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator*. Springer-Verlag.
- Antonelli, G., Fossen, T. I., Yoerger, D. R., 2008. Underwater Robotics. In: Siciliano, B., Khatib, O. (Eds.), *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Ch. 44, pp. 987–1008.
- Bachmayer, R., Whitcomb, L., Grosenbaugh, M., 2000. An accurate four quadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1), 146 – 159.
- Boyer, F., Chablat, D., Lemoine, P., Wenger, P., 2009. The eel-like robot. In: *Proceedings of the ASME IDETC/CIE 2009*, San Diego, USA.
- Bradley, A., Feezor, M., Singh, H., Sorrell, F., 2001. Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (4), 526538.
- Caffaz, A., Caiti, A., Casalino, G., Turetta, A., 2010. The hybrid glider/auv folaga. *Robotics Automation Magazine*, IEEE 17 (1), 31 –44. DOI: 10.1109/MRA.2010.935791
- Cavallo, E., Michelini, R., Filaretov, V., 2004. Conceptual design of an auv equipped with a three degrees of freedom vectored thruster. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 39 (4), 365–391.