

# Mejora de la maniobrabilidad de submarinos tripulados mediante el control óptimo de tanques de lastre

Roberto Font\*, Javier García\*\* y Francisco Periago\*

\* Departamento de Matemática Aplicada y Estadística. Universidad Politécnica de Cartagena

\*\* Dirección de Ingeniería. Navantia S. A.

E-mail: roberto.font@upct.es; jgpelaez@navantia.es; f.periago@upct.es

**Resumen.** Se estudia el posible uso del llenado y vaciado de los tanques de lastre (usualmente realizado sólo en situaciones de emergencia) como un mecanismo de control adicional que permita mejorar la maniobrabilidad de submarinos tripulados. Se propone, en primer lugar, un modelo matemático para estos procesos y se muestran resultados de simulación numérica que muestran que, efectivamente, el control óptimo de estos procesos puede mejorar notablemente el comportamiento del vehículo.

## 1. Introducción

En los últimos tiempos, la empresa Navantia y el Departamento de Matemática Aplicada y Estadística de la Universidad Politécnica de Cartagena han llevado a cabo una colaboración con el fin de mejorar la maniobrabilidad y eficiencia de sus futuros diseños. En concreto, se han desarrollado [1] algoritmos de control que permiten realizar maniobras óptimas en el sentido de minimizar el empleo de los timones o el ruido generado (haciendo al vehículo, por tanto, más difícil de detectar). Como continuación de estos trabajos, se pretende estudiar el posible uso de los tanques de lastre como un mecanismo de control adicional que permita mejorar la maniobrabilidad del submarino en situaciones particularmente difíciles.

Los tanques de lastre, distribuidos a lo largo del casco, proporcionan, cuando están llenos de agua, el peso suficiente para que el vehículo se sumerja. Una vez sumergido, el submarino es tradicionalmente controlado mediante una única hélice situada en la popa y que proporciona la velocidad de avance deseada; un timón vertical, situado también a proa, con el que se controla la orientación en el plano horizontal, y dos timones de buceo situados a proa y popa con los que se controla el movimiento vertical. En caso de emergencia, como la rotura de uno de los timones o la presencia de una vía de agua, los tanques de lastre pueden ser empleados como un mecanismo de seguridad que permite llevar rápidamente el submarino a la superficie. Para ello, aire a muy alta presión almacenado en unas botellas dispuestas al efecto es inyectado en los tanques forzando la salida del agua al exterior. De esta forma el submarino se aligera, su flotabilidad aumenta, y tiende a ascender a la superficie. Para llenar los tanques de agua, una válvula situada en su parte superior se abre de forma que el aire contenido en el tanque escapa al exterior y el agua puede inundar progresivamente el tanque. Estos procesos se denominan, respectivamente, *soplado* y *ventilación* de los tanques de lastre.

Los principales objetivos perseguidos en el presente trabajo pueden resumirse en:

- a) Obtener un modelo matemático fiable para los procesos de soplado y ventilación de tanques de lastre, así como su influencia sobre la dinámica del vehículo. Hasta la fecha sólo existen en la literatura modelos muy simplificados para estos procesos.
- b) Desarrollar una herramienta informática que permita simular cualquier maniobra que envuelva el soplado y/o la ventilación de tanques de lastre. Esto permitiría, por una parte, mejorar el conocimiento de estas maniobras y sus dificultades asociadas y, por otra, asistir a los ingenieros durante la fase de diseño, permitiéndoles variar los diferentes parámetros geométricos de forma que se cumplan las especificaciones de diseño.
- c) Explorar el posible uso del soplado y la ventilación de tanques de lastre como un mecanismo de control adicional que permita mejorar la maniobrabilidad del vehículo en escenarios particularmente complejos. En concreto, como veremos en la Sección 3, para mejorar la seguridad en maniobras de ascenso de emergencia o en situaciones en las que debido a la baja velocidad los timones no son efectivos.

Existe en la actualidad un creciente interés en el uso de vehículos submarinos no tripulados (Unmanned Underwater Vehicles) en misiones de inteligencia, contraminado o conflictos asimétricos. En efecto, no sólo proporcionan una discreción difícilmente igualable por otra plataforma, sino que evitan el riesgo de vidas humanas.

Actualmente, Navantia está desarrollando un proyecto para la incorporación en sus futuros diseños de un sistema para el lanzamiento y recuperación de UUVs. El método tradicional para llevar a cabo el lanzamiento y recuperación de UUVs ha sido posar el submarino en el lecho marino de forma que éste quede en reposo. Es indudable que esto impone grandes limitaciones en cuanto al rango de operación, por lo que en la actualidad se apuesta por el *hovering* del submarino, es decir, que el vehículo mantenga la

cota deseada sin ninguna propulsión. Puesto que en esta situación no existe velocidad de avance, los timones no son efectivos y el control debe realizarse modificando la flotabilidad del vehículo. Un control basado en el soplado y la ventilación de los tanques de lastre podría ser la solución idónea para este tipo de maniobras.

## 2. Modelo matemático

Podemos considerar que cada uno de los tanques de lastre está compuesto por la botella de aire a alta presión, la válvula de soplado que controla la inyección de aire en el tanque, el propio tanque, la válvula y conducto de ventilación y un orificio en la base del tanque que comunica éste con el exterior. La Figura 1 muestra un esquema con las principales variables involucradas en los procesos de soplado y ventilación.

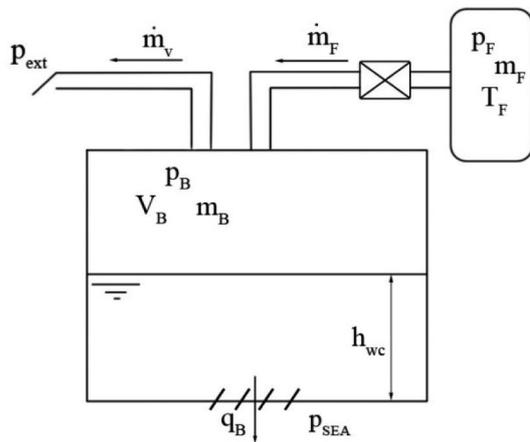


Figura 1. Vista esquemática de los procesos de soplado y ventilación.

El subíndice  $F$  denota las condiciones en la botella, el subíndice  $B$  las condiciones en el tanque,  $\dot{m}_v$  y  $\dot{m}_F$  son respectivamente los gastos máscicos a través de los conductos de ventilación y soplado y  $q_B$  es el caudal a través del orificio situado en la base del tanque. Para caracterizar el estado de los tanques introducimos tres nuevas variables por cada uno de ellos: presión en el tanque, masa de aire en la botella y masa de aire en el tanque, así como una ecuación diferencial para cada una de estas variables. El desarrollo y forma final de estas ecuaciones puede encontrarse en [2]. Una vez modelado cómo evoluciona la cantidad de agua contenida en los tanques, el siguiente paso es modelar cómo influyen estas variaciones de masa sobre la dinámica del vehículo.

El movimiento de un vehículo submarino es generalmente descrito mediante las ecuaciones propuestas por el David Taylor Naval Ship Research and Development Center [3]; un conjunto de 12 ecuaciones diferenciales ordinarias (6 ecuaciones cinemáticas y 6 dinámicas) en sus 3 coordenadas

espaciales  $x, y, z$ , las 3 velocidades lineales  $u, v, w$ , los 3 ángulos de Euler que definen su orientación (*roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$ , *yaw*  $\varphi$ ) y las 3 velocidades angulares asociadas. A medida que el agua entra o sale de los tanques de lastre se producirán variaciones de masa localizadas en diferentes puntos del vehículo. Estas variaciones de masa harán que ciertos parámetros habitualmente considerados constantes en las ecuaciones de Feldman se conviertan en funciones de la cantidad de agua contenida en los tanques. En concreto, la masa y peso del vehículo, los momentos y productos de inercia y las coordenadas del centro de gravedad. De esta forma, las ecuaciones del movimiento y las del soplado y ventilación de los tanques están acopladas, permitiendo predecir cómo estos procesos afectan al movimiento del vehículo y viceversa. Para los detalles remitimos de nuevo al lector a [2].

Este conjunto de ecuaciones puede expresarse como

$$A(x(t))\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$

siendo  $x$  el vector de estado formado por las 12 variables de estado del vehículo anteriormente descritas más las correspondientes a los tanques de lastre: presión y masa de aire en cada tanque y masa de aire en cada una de las botellas y  $u = [\delta_R, \delta_S, \delta_B, s_i, \bar{s}_i]$  el vector de control compuesto por las deflexiones de los timones y  $s_i, \bar{s}_i$ , las aperturas de las válvulas de soplado y ventilación respectivamente, de valor 1 cuando están completamente abiertas y 0 cuando están completamente cerradas.

Usando el modelo descrito como ley de estado, se han desarrollado algoritmos de control en lazo abierto [2] y cerrado [4] que permiten explorar el posible uso del soplado y la ventilación como un mecanismo de control adicional. La siguiente sección presenta los resultados de una simulación numérica en la que estos procesos son empleados para mejorar el comportamiento durante una maniobra de ascenso de emergencia.

## 3. Resultados

Como se ha dicho anteriormente, el soplado de los tanques de lastre se realiza habitualmente en situaciones de emergencia, como inundación o la rotura de alguna de las superficies de control. Un caso particularmente comprometido es aquél en el que la rotura se produce durante un giro, ya que el *roll* inicial puede fácilmente crecer hasta alcanzar valores fuera del rango admisible. En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados de la simulación de una maniobra de emergencia; el submarino está realizando un giro a 200 m de profundidad cuando el timón de popa queda bloqueado. Como consecuencia de esta avería se realiza el soplado de los tanques para llevar el submarino a la superficie. Compararemos los resultados obtenidos mediante una de las posibles formas tradicionales de proceder (soplar en primer lugar los tanques de proa y, tras 30 segundos, soplar también los de popa con intensidad

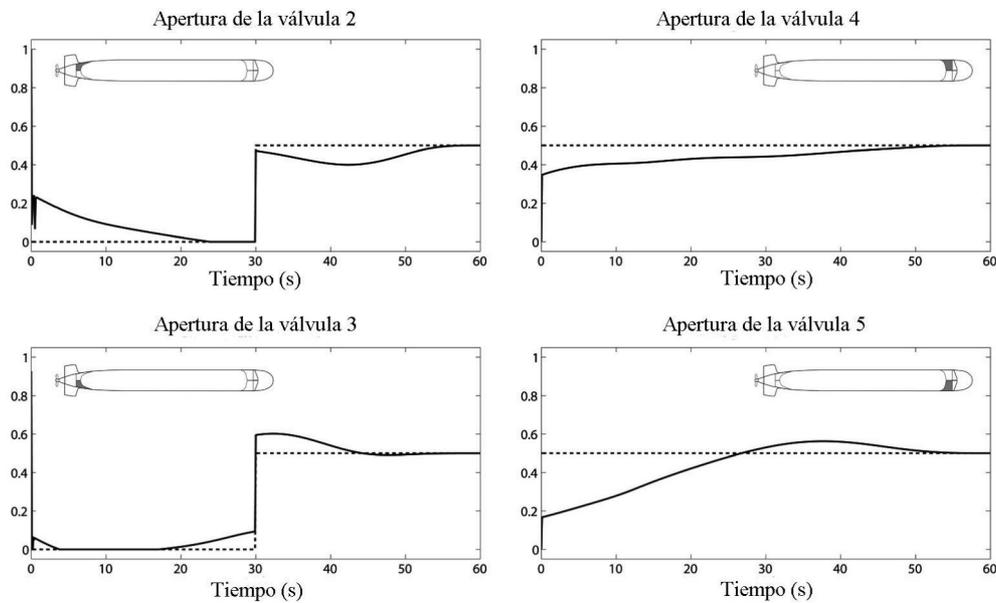


Figura 2. Controles óptimos (línea sólida) y convencionales (discontinua) para la maniobra de ascenso de emergencia.

constante,  $s_i = 0.5$ ), con los obtenidos mediante el control óptimo del soplado. Para ello emplearemos el algoritmo de control óptimo descrito en [2] buscando cumplir dos objetivos: a) tiempo de ascenso similar al necesario en la maniobra convencional, y b) ángulo de roll tan pequeño como sea posible y siempre dentro de los límites aceptables.

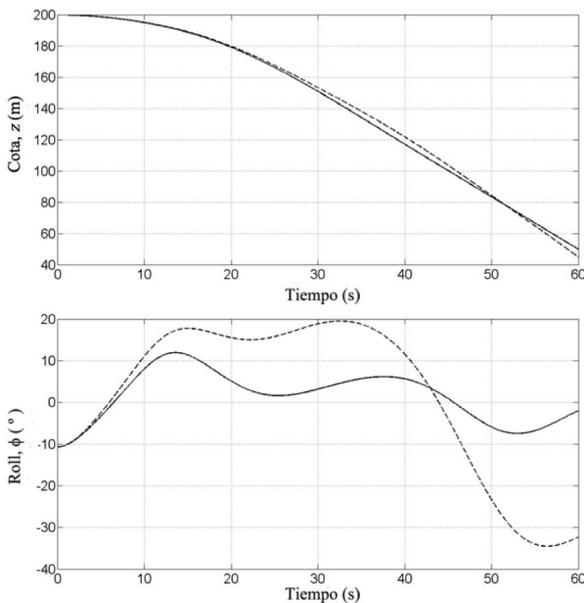


Figura 3. Evolución de la cota y del ángulo de roll mediante un procedimiento standard (línea discontinua) y el control óptimo del soplado (línea sólida)

Como podemos ver (Figura 3, parte superior), el tiempo necesario para el ascenso, nuestro primer objetivo, es muy similar en ambos casos. En la parte inferior de la figura, sin embargo, podemos ver que el procedimiento tradicional para el soplado lleva a ángulos de *roll* cercanos a los  $40^\circ$ , un valor superior al admisible y cercano a suponer un riesgo para la tripulación, mientras que el uso controlado de este mecanismo logra mantener este ángulo en el entorno de los  $\pm 10^\circ$ , un valor perfectamente admisible.

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que, en efecto, el adecuado control de los tanques de lastre puede contribuir a mejorar notablemente el comportamiento del vehículo. El trabajo futuro se centrará en el estudio del citado *hovering* donde el control debe realizarse únicamente con los tanques, sin ayuda de los timones.

## Referencias

- [1] D. Ovalle, J. García, F. Periago(2011) Analysis and numerical simulation of a nonlinear mathematical model fortesting the manoeuvrability capabilities of a submarine. *NonLinear Analysis B: RealWorld Applications*, 12pp. 1654-1669.
- [2] R. Font, J. García, A. Murillo, F. Periago(2011) Modeling and control of blowing-venting operations in manned submarines. En revisión. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1107.0622>
- [3] J. Feldman (1979) *Revised standard submarine equations of motion*. David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Washington DC, DTNSRDC/SPD-0393-09.
- [4] R. Font, P. Pedregal y F. Periago (2011) A numerical method for computing optimal controls in feedback and digital forms and its application to the blowing-venting control system of manned submarines. Aceptado en *Optimal Control Applications and Methods*.