

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INMERSIÓN PARA PLATAFORMAS DE SENSORES SUBMARINAS

Morales-Aragón, Isabel Pilar; Soto-Valles, Fulgencio; González-Teruel, Juan Domingo; Torres-Sánchez, Roque

Departamento de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus de la Muralla s/n 30202 Cartagena.

isamoralesaragon@gmail.com; pencho.soto@upct.es; juando.gonzalez@upct.es; roque.torres@upct.es

Resumen

Las plataformas de sensores son utilizadas como focos de información de ciertos entornos específicos. En el ámbito de los sistemas marítimos y oceanográficos, estas plataformas permiten sensorizar ciertas propiedades del agua a partir de diversas variables, como es el caso del nivel de oxígeno, los niveles de turbidez, clorofila, salinidad, etc. Debido a las diferentes estratificaciones que se producen en este entorno a diferentes profundidades, es necesario realizar la medida a diferentes profundidades. Por ello, este proyecto se va a centrar en el diseño de un algoritmo de control con el fin de gestionar la profundidad de un objeto con capacidad de inmersión, permitiendo así, detener dicha arquitectura sumergible a una profundidad deseada. De manera progresiva se irá analizando el sistema de control, el cual permitirá gestionar la profundidad en función de la posición a la que se encuentren de los actuadores. Para ello, se abordarán diferentes puntos, como es el caso de las consideraciones y características constructivas del modelo, el estudio detallado del comportamiento de cada uno de los principales componentes de sistema, así como de la respuesta de las variables a estudiar. Además, dicho sistema de control se implementará en un microcontrolador con el fin de proporcionar las señales adecuadas en cada instante de tiempo, permitiendo así, que los actuadores introduzcan o desalojen un volumen determinado de agua y, por consiguiente, se logre alcanzar un adecuado y autónomo desplazamiento de la plataforma.

Palabras clave: plataforma de sensores, boya submarina, WSN, control de profundidad, simulación de procesos.

1. Introducción

La contaminación del medio marino es un complejo tema de inmensa importancia científica y política. Con el fin de desarrollar una comprensión de los problemas de la contaminación marina, se confía tanto en la investigación como en el seguimiento de los océanos, haciendo así que el medio ambiente oceánico moderno emerja como el próximo reto para el análisis de datos.

Las lagunas costeras se definen como tramos de agua salada o salobre en áreas costeras que están separadas del mar por una lengua de tierra u otra topografía similar. Estos cuerpos de agua pueden conectarse al mar en puntos limitados, ya sea de forma permanente o solo durante parte del año. Una vez que se ha formado una barrera de laguna y está debidamente aislada del mar abierto, los sedimentos más finos pueden depositarse en el área detrás de la barrera, incluidos los sedimentos traídos del continente. Como resultado, las propiedades del agua dentro de la laguna pueden diferir significativamente de las aguas abiertas del mar (por ejemplo, en oxígeno disuelto, carga de sedimentos, salinidad, etc.). Esto permite la generación de ambientes ricos en nutrientes y resguardados (protegidos de la acción de las olas), que pueden desarrollar una flora y fauna singular.

Las lagunas costeras son ambientes comunes en la zona de transición ubicada entre ecosistemas terrestres y mares adyacentes. Estos ecosistemas están controlados por interacciones complejas entre la tierra,

el océano y la atmósfera, lo que resulta en entornos altamente cambiantes y vulnerables. En la mayoría de los casos, las actividades humanas tienen una fuerte influencia en estos procesos e interacciones. El Mar Mediterráneo alberga una importante población humana y es una zona adecuada para la agricultura y el turismo. En la costa mediterránea española, esta presión se ha incrementado drásticamente en las últimas décadas como consecuencia del desarrollo agrícola y turístico descontrolado. Por ello, las lagunas costeras de esta zona presentan con frecuencia alteraciones y fluctuaciones físicas y químicas, considerándose en ocasiones como sumideros de desechos, lo que provoca su degradación ambiental.

La laguna del Mar Menor es una de las singularidades ecológicas más importantes del área mediterránea. Es un área donde se encuentran muchas actividades económicas e industriales, haciendo así que la suma de los impactos de la minería, la agricultura y el desarrollo urbano alrededor de la laguna durante las últimas décadas haya afectado su ecosistema.

Para satisfacer la necesidad de una mejor evaluación del cambio del ecosistema en escalas temporales y espaciales apropiadas, se requieren nuevas estrategias de medición basadas en observaciones continuas o semicontinuas. El objetivo es cuantificar el estado del mar obteniendo datos sobre las temperaturas que se presentan en la superficie, salinidad, nivel de oxígeno, los niveles de turbidez, clorofila, etc. Por ello, se presenta la necesidad de diseñar y fabricar pequeñas arquitecturas flotantes de bajo costo que permitan crear una red de datos oceánicos en tiempo real sobre el estado actual de la laguna del Mar Menor.

De este modo, surge el objetivo de este proyecto, el cual consiste en el diseño de un algoritmo de control y su implementación en un microcontrolador, con objeto de gestionar el ascenso y descenso de una plataforma sumergible mediante la variación del volumen de agua presentado en cada uno de sus tanques de lastre en cada instante de tiempo.

Para ello, se va a llevar a cabo el estudio de una plataforma sensorial real teniendo en cuenta los diferentes principios que afectan a un cuerpo sumergido en un fluido y que su dirección de desplazamiento es únicamente vertical.

2. Metodología

Para llevar a cabo este estudio hay que tener en cuenta la geometría exterior de la plataforma. La plataforma consta de dos sistemas de lastre accionados por motores de corriente continua. Dichos sistemas de lastre van a ser los encargados de modificar el peso de

la plataforma mediante el llenado o expulsión de agua de sus respectivos tanques de llenado, los cuales presentan una capacidad de 0,75 litros cada uno.

Teniendo en cuenta estas características que presenta la plataforma, para alcanzar el objetivo marcado se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- **Modelado del comportamiento del actuador**

Los actuadores que permiten el desplazamiento vertical de la plataforma se basan en el principio de variación del peso de esta. Ambos actuadores están accionados por motores que son capaces de expulsar agua del interior del tanque de llenado al exterior para hacer que el sistema ascienda o, por el contrario, introducir agua hacia el interior del tanque para hacer que este descienda.

El modelado del comportamiento del sistema de lastre se lleva a cabo a través de la geometría de los depósitos de lastre y de los motores que los accionan, obteniendo así, la función de transferencia en lazo abierto teniendo en cuenta el tiempo que estos necesitan en completar un recorrido completo:

$$\frac{x(s)}{V(s)} = \frac{0,08698}{s^2 - 104,015 \cdot s} \quad (1)$$

- **Obtención del punto de equilibrio**

Se va a denominar punto de equilibrio al peso de la plataforma que permite que esta permanezca estática a una determinada profundidad durante un tiempo para permitir tomar medidas satisfactorias del estado de las variables a esa profundidad.

Partiendo del principio de Arquímedes, se obtiene que el punto de equilibrio es aquel que permite igualar su peso con el empuje que esta sufre debido al volumen de agua que desaloja al ser sumergida.

- **Modelado de la evolución de la posición de la plataforma**

Partiendo del peso de equilibrio, se procede a medir el tiempo transcurrido hasta que la plataforma sumergible alcanza la superficie con respecto a una profundidad determinada.

Esto, junto con tener en cuenta diversos principios que influyen al encontrarse un cuerpo sumergido en un fluido, permite definir la evolución que presenta la profundidad a la que se encuentra la plataforma a lo largo del tiempo:

$$\frac{z(s)}{x(s)} = \frac{1,69}{s^2} \quad (2)$$

• **Construcción de la simulación**

La combinación de la evolución de la profundidad con la variación del peso de la plataforma en función del estado del sistema de lastre permite obtener un algoritmo de control, el cual logra que dicha plataforma alcance la profundidad deseada en cada momento. Dicho algoritmo se puede plantear en base a dos tipos de arquitectura: por un lado, una arquitectura que tiene en cuenta el retardo existente entre la acción de control y el desplazamiento de la plataforma, para el que se implementa un Predictor de Smith y, por otro lado, otra arquitectura en la que se considera que el proceso no presenta un tiempo de retardo entre la variación del sistema de lastre y la profundidad a la que se encuentra la plataforma.

• **Implementación del algoritmo en una plataforma hardware**

Estudiando ambas arquitecturas comentadas anteriormente, diferenciadas en función del tiempo muerto, se procede a la discretización del algoritmo de control y su posterior implementación en un microcontrolador, con el fin de comprobar la correspondencia que presenta el modelo diseñado con el real.

• **Ensayos de registro de profundidad y posición de los actuadores en la plataforma hardware**

Tras la implementación del sistema de control en la plataforma, se procede a la obtención de datos de profundidad a través de ensayos mediante un sensor de profundidad. Esto permite la obtención de datos reales de la evolución de la posición a la que se encuentra la plataforma sumergible en función del volumen de lastre presente en el interior del tanque.

3. Resultados

3.1. Controladores necesarios para el sistema de control

En primer lugar, en cuanto a la primera etapa del estudio del prototipo a través de simulaciones, se pudo comprobar que al modelar el proceso de la profundidad que alcanza la plataforma en función del volumen de agua que presentan sus tanques de lastre, se obtiene un sistema de segundo orden con sus dos polos en el origen. Esta disposición de los polos implica un proceso al límite de la estabilidad y conlleva una complejidad extra a la hora de modelar el controlador que permitiese estabilizar el sistema. Aun así, se pudo alcanzar un control del proceso con éxito e incluso obtener una dinámica amortiguada.

Dicha gestión del proceso se pudo lograr mediante controladores encargados de determinar el comportamiento del lazo de control y de ajustar la acción del actuador según el error que se obtiene en cada instante de tiempo.

Por un lado, el controlador al que se recurrió para modelar el correcto funcionamiento de los actuadores fue un controlador ON/OFF. Dicho controlador permite, mediante un simple algoritmo, comprobar si la variable realimentada del proceso que se está controlado se encuentra por debajo o por encima de un determinado *setpoint*. De este modo, la señal obtenida por el controlador únicamente toma valores binarios.

Por otro lado, en cuanto el control de la profundidad a la que se encuentra la plataforma en función del volumen de lastre, el sistema presenta una dinámica inestable, por lo que si no se emplease ningún tipo de controlador, la variable sería incontrolable, tal como se muestra en la Figura 1.

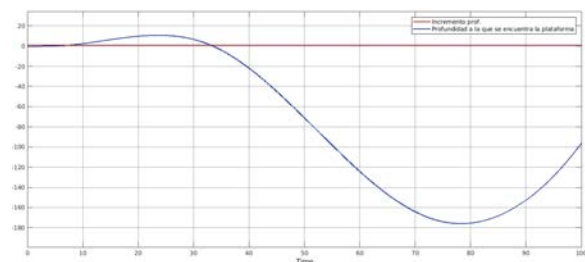


Figura 1. Dinámica de la profundidad en lazo cerrado sin controlador.

Por ello, a diferencia de lo que ocurría con los actuadores, en este caso no sería válido emplear un controlador ON/OFF, puesto que resulta necesario mejorar el comportamiento que presenta dicho sistema para poder obtener la dinámica deseada.

Para permitir el correcto funcionamiento de la plataforma que se encuentra en estudio, se va a emplear un controlador PD. De este modo, la acción proporcional se va a encargar de reducir el error y la acción derivativa mejorará sobre todo el transitorio, haciendo así que la dinámica resultante presente menos sobreoscilaciones. Además, la acción derivativa va a ponderar a la referencia por un factor $\beta = 0$, permitiendo así que la dinámica de la salida no dependa de la entrada y, por consiguiente, sea más sencillo su control.

Para tener completamente determinado dicho controlador, únicamente faltaría obtener el valor de la ganancia proporcional y derivativa. Para ello, se estudiaron varios métodos. Uno de ellos es el primer método de Ziegler-Nichols. Este método basado en el estudio del sistema en lazo abierto nos permite

observar que se obtenía una dinámica integradora para una determinada entrada, tal como se muestra en la Figura 2, concluyendo así la invalidez del método para nuestro caso.

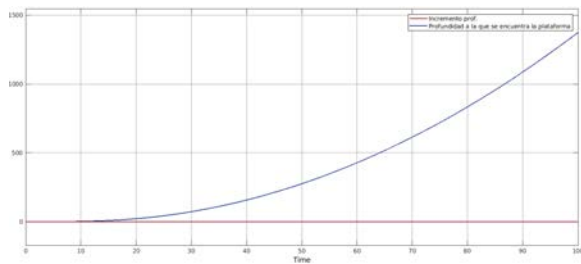


Figura 2. Dinámica de la profundidad de la plataforma ante una entrada escalón en lazo abierto.

Debido a la imposibilidad de emplear el método anterior, se procede a estudiar el comportamiento en lazo cerrado aplicando el segundo método de Ziegler-Nichols. En este caso se pretende llegar a un comportamiento no amortiguado aplicando únicamente una ganancia proporcional. De esta forma, se comprueba que teniendo únicamente un controlador proporcional nunca se llega a alcanzar un comportamiento no amortiguado. Por ello, los valores de ganancia proporcional y derivativa proceden a obtenerse de manera experimental. Además, cabe destacar que este proceso es íntegramente experimental, por lo que únicamente se van a presentar las gráficas que presenten una mayor relevancia y no conlleven a un comportamiento inestable.

Para una ganancia proporcional $k_p = 0,02$ y una ganancia derivativa $k_d = 0,2$ se presenta un sistema estable, con una dinámica amortiguada y con un tiempo de establecimiento aproximadamente de 30 segundos (Figura 3).

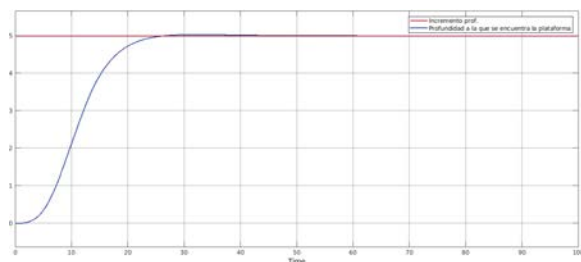


Figura 3. Dinámica que presenta la plataforma para $k_p = 0,02$, $k_d = 0,2$ y una entrada escalón igual a 5.

Si se reduce la acción derivativa a la mitad y la ganancia proporcional se mantiene constante, se puede observar que el tiempo de establecimiento es mucho más lento y además presenta sobreoscilaciones (Figura 4), por lo que con dichas ganancias se obtiene un comportamiento peor.

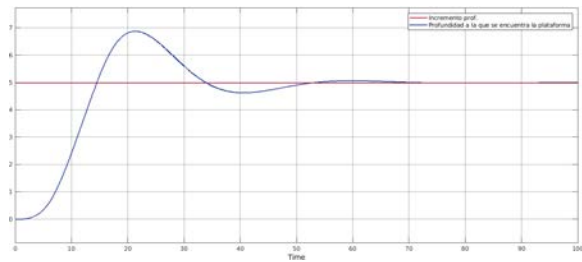


Figura 4. Dinámica que presenta la plataforma para $k_p = 0,02$, $k_d = 0,1$ y una entrada escalón igual a 5.

Por otro lado, también se podría aumentar la ganancia proporcional y estudiar cómo se comporta el sistema. Para $k_p = 0,03$ y $k_d = 0,2$ se puede observar que se obtiene un sistema inestable (Figura 5).

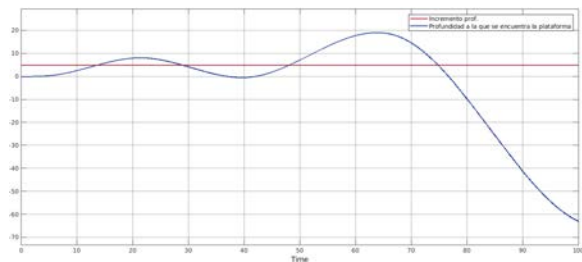


Figura 5. Dinámica que presenta la plataforma para $k_p=0,03$, $k_d=0,2$ y una entrada escalón igual a 5.

Además, si se dejase la ganancia proporcional igual a 0,03 y se incrementa la acción derivativa ($k_d = 0,3$), se obtendría un sistema estable, pero con un comportamiento peor al mostrado primeramente (Figura 6).

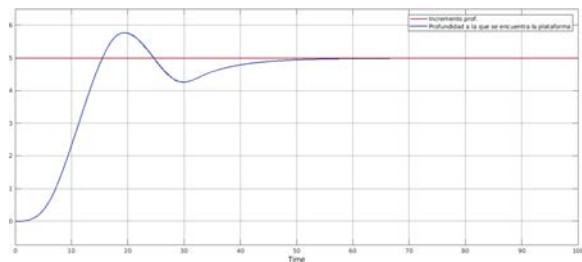


Figura 6. Dinámica que presenta la plataforma para $k_p = 0,03$, $k_d = 0,3$ y una entrada escalón igual a 5.

Después de este análisis, se puede concluir que el controlador que permite obtener una mejor dinámica del sistema presenta una ganancia proporcional y derivativa igual a 0,02 y 0,2, respectivamente.

Tanto el controlador ON/OFF como el controlador PD, junto con las funciones de transferencia que permiten modelar tanto el comportamiento de los actuadores como de la plataforma, permiten obtener un lazo de control capaz de gestionar la profundidad de dicha plataforma (Figura 7), obteniéndose una

dinámica amortiguada y con un tiempo de establecimiento pequeño (Figura 8).

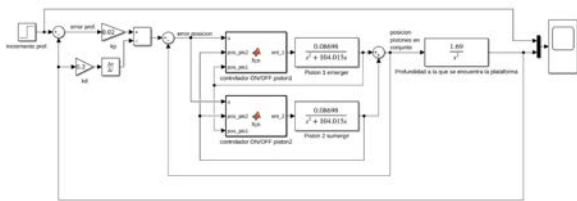


Figura 7. Arquitectura de control sin tiempo muerto.

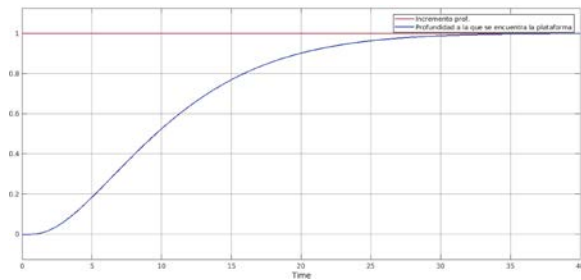


Figura 8. Evolución de la profundidad para un setpoint de 1 metro sin tener en cuenta el tiempo muerto.

3.2. Predictor de Smith

Uno de los fenómenos inherentes al sistema es que cuando los tanques de lastre se llenan, la plataforma tarda un tiempo en comenzar a sumergirse. Igualmente, cuando la plataforma se encontraba en movimiento de descenso y los pistones desalojaban lastre, se observa que, aun así, la plataforma continuaba descendiendo hasta un determinado tiempo, en el cual esta comenzaba a emerger. Por ello, se pudo observar que el sistema presentaba un determinado tiempo de retardo entre la acción de los actuadores y la respuesta que presentaba la plataforma. Este tiempo muerto se produjo debido a que dicho proceso necesita un determinado tiempo para transportar energía. Como consecuencia de este fenómeno, se tuvo que estudiar el comportamiento del sistema ante diferentes tiempos de retardo. El sistema no presenta un buen comportamiento ante la presencia de retardos (Figura 9), viéndose así la necesidad de implementar un compensador de tiempo muerto.

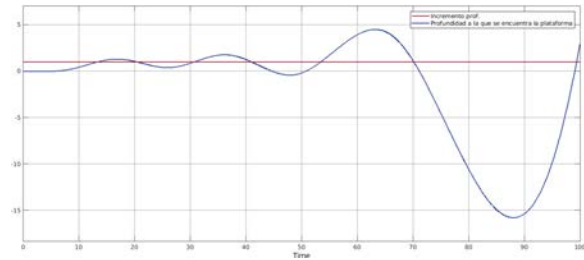


Figura 9. Dinámica de la profundidad ante un delay de 4 segundos.

De todos los compensadores de tiempo muerto, se escogió el Predictor de Smith, el cual es un modelo capaz de lograr que la respuesta que tiene un sistema con un determinado retardo presente la misma dinámica que tendría ese sistema sin retardo, es decir, ante una determinada entrada, presenta la misma dinámica, pero desplazada en el tiempo (Figura 10).

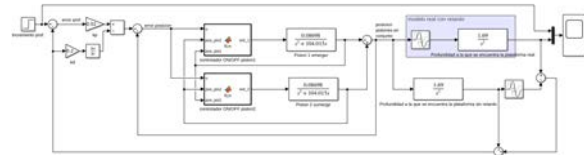


Figura 10. Arquitectura de control con Predictor de Smith.

Una vez implementado dicho compensador de tiempo muerto, se puede observar que la dinámica obtenida presentaba el mismo comportamiento dinámico retrasada en el tiempo (Figura 11).

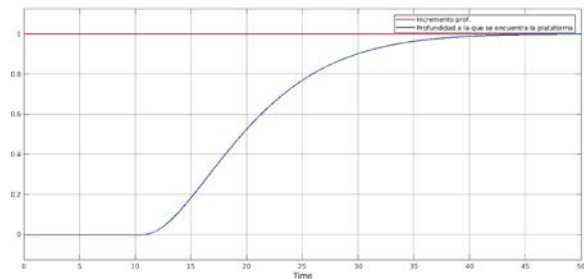


Figura 11. Dinámica de la profundidad ante un delay de 10 segundos aplicando el Predictor de Smith.

3.3. Implementación en un microcontrolador

En la última fase de este estudio, la simulación se traslada a la realidad mediante la implementación del sistema de control en un microcontrolador de la serie ESP32 con capacidad de gestión de todo el proceso. Dicho microcontrolador, programado en micropython, tiene capacidad de gestionar 8 ADC para lectura de datos, varias I/O para accionar los sistemas de lastre y un sistema de comunicación Sigfox para el envío de los datos en superficie.

Cabe destacar que hasta ahora se ha trabajado con un sistema de control continuo, pero a la hora de implementarlo en un microcontrolador, es necesario discretizarlo. A diferencia de las señales continuas, las señales discretas únicamente toman valores en una cantidad determinada de puntos evaluados en nT , donde T es el periodo de muestreo y n el número de muestra. Cada muestra aparece ordenada en la posición que se ha ido generando, por lo que las señales ya no se representan en función del tiempo, sino en función del número de muestra.

Existen diferentes aproximaciones para discretizar señales continuas. Por su simplicidad y puesto que es una aproximación que presenta una gran exactitud, se va a emplear una aproximación rectangular y, puesto que se desconocen los valores futuros, se va a emplear una diferencia regresiva. Por ello, el término proporcional y derivativo vendrán dados por las ecuaciones 3 y 4, respectivamente:

$$k_p e(t) = k_p e(n) \tag{3}$$

$$k_d \frac{e(t)}{dt} = k_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \tag{4}$$

siendo $e(t)$ el error continuo, $e(n)$ el error en la muestra actual y $e(n-1)$ el error en la muestra anterior.

Finalmente, puesto que el controlador que se desea implementar en este caso presenta el término derivativo ponderado a la referencia por un factor $\beta = 0$, es decir, la acción derivativa no depende del error, sino de la variable salida del sistema:

$$k_d \frac{z(t)}{dt} = k_d \frac{z(n) - z(n-1)}{T} \tag{5}$$

siendo $z(n)$ la profundidad a la que se encuentra la plataforma en la muestra actual y $z(n-1)$ la profundidad en la muestra anterior.

Por otro lado, en el caso de trabajar con señales digitales que posteriormente van a actuar sobre un proceso continuo, es necesario transformar dichas señales a otras prácticamente continuas. Por ello, el funcionamiento de los actuadores se discretizó teniendo en cuenta un retenedor de orden cero. Dicho retenedor o sostenedor permite reconstruir la señal manteniendo el valor de la última muestra de manera constante hasta que se genera la próxima muestra [11]. Puesto que se desea discretizar la acción de los pistones con el fin de poder implementarlo en el microcontrolador, se empleó la transformación ZOH:

$$F(z) = (1 - z^{-1})Z \left[\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{F(s)}{s} \right) \right] \tag{6}$$

Para discretizar el sistema de forma general, la ecuación 1 se puede expresar en términos generales como:

$$F(s) = \frac{b}{s^2 - a \cdot s} \tag{7}$$

De forma que la función discretizada aplicando la transformación ZOH quedaría:

$$F(z) = \frac{b(-1 + aT - e^{-aT})z^{-1}}{a^2(1 - (e^{-aT} + 1)z^{-1} - e^{-aT}z^{-2}) - b \cdot (1 + aTe^{-aT} - e^{-aT})z^{-2}} - \frac{b \cdot (1 + aTe^{-aT} - e^{-aT})z^{-2}}{a^2 \cdot (1 - (e^{-aT} + 1)z^{-1} - e^{-aT}z^{-2})} \tag{8}$$

que, sustituyendo los valores, se obtiene la función de transferencia del comportamiento del sistema de lastre discretizado:

$$F(z) = \frac{x(z)}{V(z)} = \frac{0,00042345 \cdot z^{-1} + 0,000008 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \tag{9}$$

Expresando la ecuación anterior en función de las muestras de tensión y el sistema de lastre, queda:

$$x(n) = 4 \cdot 10^{-4} \cdot V(n-1) + 8 \cdot 10^{-6} \cdot V(n-2) + x(n-1) \tag{10}$$

Por último, de manera análoga al caso anterior, se discretiza el modelo de la profundidad, obteniéndose la profundidad en función de las muestras de posición del sistema de lastre y de profundidad:

$$z(n) = 0,2 \cdot x(n-1) + 0 \cdot x(n-2) + 2 \cdot z(n-1) - z(n-2) \tag{11}$$

De este modo, se ha llevado a cabo la puesta en marcha de los ensayos con el fin de estudiar la validez de la arquitectura de control propuesta. Tras dichos ensayos se pudo observar un resultado satisfactorio. En cualquier caso, aunque el algoritmo descrito permite obtener un control de la profundidad a la que se encontraba la plataforma, se pudo observar que se presentaba un punto de funcionamiento muy crítico y, por consiguiente, las variaciones del peso de funcionamiento de la plataforma dificultaban un control óptimo.

4. Conclusiones

En la primera fase del estudio se logró diseñar un algoritmo de control capaz de gestionar la profundidad a la que se encuentra una plataforma sumergible. Este diseño se llevó a una fase de simulación, en la cual se obtuvo una dinámica amortiguada, sin sobreoscilaciones y con un tiempo de establecimiento

aproximado a 30 segundos. Una vez validado el modelo mediante simulaciones, se llevaron a cabo ensayos reales. Para tal fin se procedió a discretizar el sistema de control obtenido y, a su posterior implementación en un microcontrolador.

Tras llevar a cabo ensayos con el sistema real, se llegó a la conclusión de varios aspectos que podrían dificultar la obtención de un control óptimo a largo plazo. Como se ha comentado en el apartado de metodología, el punto de funcionamiento presente en el control es bastante crítico. Esta situación crítica estuvo causada por el método de actuación del sistema de lastre. Estos actuadores permiten el control del sistema a través de una actuación todo/nada y un tiempo de llenado de cada tanque de 20 segundos. La incapacidad de generar un volumen de lastre constante en el tiempo ni una respuesta rápida hace que, al presentar variaciones del punto de funcionamiento, los actuadores no estén capacitados para corregir esta modificación con la presteza necesaria y, por consiguiente, no se logre mantener la plataforma estable a una determinada profundidad de manera efectiva. Las plataformas de sensores sumergidas en el mar, como la planteada en este estudio, son propicias a la acumulación de organismos y partículas en su superficie (fenómeno conocido como *fouling*). Como consecuencia, a medida que va pasando el tiempo, el peso de funcionamiento se vería modificado, lo que daría lugar a un distanciamiento entre el modelo y el sistema real, generando un control insatisfactorio de la profundidad de la plataforma. Por ello, se cree necesario llevar a cabo un rediseño del sistema incidiendo, sobre todo, en la acción de control sobre el sistema de lastre, rediseñando éste para que la proporción entre el volumen del lastre y el peso muerto del sistema sea más elevada, y de ese modo el punto de funcionamiento no sea tan crítico. Por otro lado, es necesario realimentar el estado del sistema de lastre con objeto de reducir el tiempo de establecimiento del sistema y mejorar su dinámica en los procesos de inmersión y subida a superficie.

English summary

STUDY AND DESIGN OF AN IMMERSION CONTROL SYSTEM FOR SUBMARINE SENSOR PLATFORMS

Abstract

Sensor platforms are used as sources of information for certain specific environments. In the field of maritime and oceanographic systems, these platforms make it possible to sensorize certain properties of the water based on various variables, such as the oxygen level, the levels of turbidity, chlorophyll, salinity, etc. Due to the different stratifications that occur in this environment at different depths, it is necessary to perform the measurement at different depths. Therefore, this project will focus on the design of a control algorithm to manage the depth of an object with immersion capacity, thus allowing the submersible architecture to be stopped at a desired depth. The control system will be progressively analyzed, which will allow the depth to be managed depending on the position of the actuators. For this, different points will be addressed, such as the considerations and constructive characteristics of the model, the detailed study of the behavior of each of the main components of the system, as well as the response of the variables to be studied. In addition, said control system will be implemented in a microcontroller to provide the appropriate signals at each instant of time, thus allowing the actuators to introduce or dislodge a specific volume of water and, consequently, achieve an adequate and autonomous platform movement.

Keywords: sensor platform, underwater buoy, WSN, depth control, process simulation.

Referencias

- [1] Matlab, «The MathWorks, Inc.» 1 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098.
- [2] Atom, «Atom text editor, v1.55.0.» [En línea]. Available: <https://atom.io/>.
- [3] Fred de Haro & Bettina Rubek Slater, «Pycom, Inc.» Surrey Technology Park 2 Huxley Road Guildford Surrey GU2 7RE, United Kingdom.
- [4] Pycom, «Pycom go invent, Expansionboard 3.0.» [En línea]. Available: <https://docs.pycom.io/datasheets/expansionboards/expansion3/>.
- [5] Pycom, «Pycom go invent, Wipy 3.0.» [En línea]. Available: <https://docs.pycom.io/datasheets/development/wipy3/>.
- [6] T. S. S. Transmisiones, «Catálogo general de productos.» 2016. [En línea]. Available: <https://tercesa.com/wp-content/uploads/2017/12/Catalogo-Motor-DC.pdf>.
- [7] J. C. M. Rios, «Friction. Fluid resistance.» 2015. [En línea]. Available: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2015/11/resistencia-del-fluido.html>.
- [8] «Physical properties of water and seawater.» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/maru_j_ms/apendiceA.pdf.
- [9] Engel, «Alexander Engel, Inc.» Richard-Wolf-Str. 2, D-75438 Knittlingen, Germany.
- [10] J. M. J. Martínez, «Analog to digital converters».
- [11] «Discrete Time Signal Processing.» [En línea]. Available: http://dea.unsj.edu.ar/control3/teoría/capitulo2_digitalizacionTZ.pdf.
- [12] «Discretization of regulators and plants.» [En línea]. Available: <http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/control/clase/04.DiscretizaciondeControladoresyPlantas.pdf>.
- [13] Ó. G. Palencia, «Diseño preliminar de un sumergible turístico para 30 pasajeros».
- [14] «The RC Submarine Shipyard.» [En línea]. Available: <https://www.rcshipyard.com/tech/#6>.
- [15] A. G. Sorribes, «Sistemas dinámicos con retardos temporales.» Octubre 2011. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79431/Garc%EDa%20-%20Sistemas%20din%20Elmicos%20con%20retardos%20temporales:%20contribuci%F3n%20al%20desarrollo%20de%20predictores%20ro...pdf;jsessionid=EB6CF117866ADDEA8670F15CF722F4BD?sequence=1>.
- [16] Silke Kröger, Sergey Piletskyb, Anthony P.F. Turner, «Biosensors for marine pollution research, monitoring and control.» United Kingdom.
- [17] Juan A. Campillo, Angel Sevilla, Marina Albentosa, Cristina Bernal, Ana B. Lozano, Manuel Cánovas, VíctorM. León, «Metabolomic responses in caged clams, *Ruditapes decussatus*, exposed to agricultural and urban inputs in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, SE Spain).» Murcia, Spain, 2015.
- [18] Alexander Laun & Elizabeth Pittman, «Development of a Small, Low-Cost, Networked Buoy for Persistent Ocean Monitoring and Data Acquisition.» Maryland.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).