

## Evaluación de un actuador híbrido para rehabilitación robótica subacuática

Herraiz-Sala, M.<sup>a,\*</sup>, Peral-Sempere, E.<sup>a</sup>, Belmonte-Cerdán, E.<sup>a</sup>, Miñano, F.J.<sup>a</sup>, Blanco-Ivorra, A.<sup>a</sup>, García-Aracil, N.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo de investigación de Robótica e Inteligencia Artificial del Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad, 03202, Elche, España.

### Resumen

Los trastornos neurológicos como el accidente cerebrovascular, la esclerosis múltiple o las neuropatías graves reducen de forma significativa la autonomía y la calidad de vida de los pacientes. Aunque las tecnologías robóticas han demostrado ser útiles en procesos de rehabilitación, suelen excluir a pacientes con sintomatología severa, especialmente aquellos que presentan espasticidad. La terapia acuática ha demostrado ser eficaz en la reducción de la espasticidad, gracias a propiedades como la flotabilidad, la presión hidrostática y la resistencia del agua, que facilitan el movimiento y favorecen la relajación muscular. En este contexto, surge el proyecto NOHA, que plantea un nuevo paradigma de rehabilitación combinando la robótica con los beneficios del medio acuático. Este artículo presenta los primeros resultados del estudio de viabilidad de un sistema de actuación híbrido subacuático.

*Palabras clave:* Control de sistemas híbridos, Robótica submarina, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, Análisis y optimización de sistemas, Tecnología robótica

### Evaluation of a hybrid actuator for underwater robotic rehabilitation

#### Abstract

Neurological disorders such as stroke, multiple sclerosis, or severe neuropathies significantly reduce patients' autonomy and quality of life. Although robotic technologies have proven useful in rehabilitation processes, they often exclude patients with severe symptoms, especially those presenting with spasticity. Aquatic therapy has been shown to be effective in reducing spasticity, thanks to properties such as buoyancy, hydrostatic pressure, and water resistance, which facilitate movement and promote muscle relaxation. In this context, the NOHA project arises, proposing a new rehabilitation paradigm that combines robotics with the benefits of the aquatic environment. This paper presents the initial results of the feasibility study of a hybrid underwater actuation system.

*Keywords:* Control of hybrid systems, Underwater robotics, Assistive technology and rehabilitation engineering, System analysis and optimization, Robotics technology

### 1. Introducción

Los accidentes cerebrovasculares (ACV), la esclerosis múltiple, o las neuropatías graves, son algunos de las principales causantes de reducir drásticamente la autonomía y la calidad de vida de cientos de miles de personas en Europa (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022). En los últimos años ya es una evidencia que las tecnologías robóticas pueden ayudar durante el proceso de rehabilitación de estos pacientes (Wang et al., 2024; Mehrholz et al., 2020). Sin embargo, es habitual excluir de los estudios a los pacientes que sufren de sintomatología

severa, ya que la mayoría de las tecnologías robóticas no ofrecen una asistencia adaptada a las necesidades de este tipo de pacientes (Kiyono et al., 2024; Zanatta et al., 2022).

Dentro de la sintomatología grave que presentan los pacientes con afecciones neurológicas, uno de los signos más frecuentes y relevantes es la espasticidad. Este fenómeno ha sido, y continúa siendo, un tema central en el abordaje y la rehabilitación de personas con trastornos neurológicos, debido a su impacto significativo en la funcionalidad y calidad de vida del paciente (Qu et al., 2023). A pesar de todo ello, actualmente no se dispone de tecnología para el tratamiento eficaz de estos pacientes (Forbrigger et al., 2023; Huang et al., 2024).

\*Autor para correspondencia: mherraiz@umh.es

La terapia acuática ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de diversos trastornos neurológicos (Palladino et al., 2023; Lozano-Puertas et al., 2018). Las propiedades únicas del agua, como la flotabilidad, la presión hidrostática y la resistencia, facilitan el movimiento y contribuyen a reducir la espasticidad. Asimismo, favorecen la realización de ejercicio físico y cardiovascular, el entrenamiento de resistencia y promueven la relajación corporal (Xiang et al., 2024).

En este contexto surgió el proyecto NOHA, cuyo objetivo es investigar un nuevo paradigma de rehabilitación que combine la robótica con los beneficios de la terapia acuática. Este artículo presenta los primeros resultados del estudio de viabilidad de un novedoso sistema de actuación híbrido diseñado para funcionar en entornos subacuáticos. El actuador propuesto busca aprovechar la baja impedancia del sistema de propulsión por chorro de agua junto con la velocidad y precisión de un motor eléctrico de corriente continua. En primer lugar, se formula el modelo teórico utilizado para analizar el comportamiento del nuevo concepto de actuador híbrido propuesto. A continuación, se describe el montaje experimental empleado para realizar las pruebas de viabilidad.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Modelo hidrodinámico

Al expulsar un chorro de agua a través de un propulsor, se genera una fuerza de empuje en la dirección del chorro y en sentido contrario. Esta fuerza induce un par de giro, denominado par del propulsor,  $\tau_p$ . Este fenómeno se puede describir matemáticamente mediante el modelo teórico presentado en (1).

$$\tau_p = \rho_{H_2O} \cdot \frac{\dot{V}^2}{A_p} \cdot r_p \cdot \left(1 - \frac{C_m}{2}\right) \quad (1)$$

Donde  $\rho_{H_2O}$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $\dot{V}$  es el caudal volumétrico del chorro de agua expulsado ( $m^3/s$ ),  $A_p$  es el área ( $m^2$ ) de salida del propulsor,  $r_p$  es la distancia (m) a la que se encuentra el propulsor con respecto al eje de rotación y  $C_m$  la resistencia al medio externo, un valor adimensional obtenido experimentalmente que permite expresar el par generado por el sistema en función de la densidad del medio, la velocidad y otras características geométricas del sistema. El parámetro  $\dot{V}$  es la variable de control del sistema.

Aunque la fuerza de propulsión constituye el principal medio de control del sistema, al tratarse de un actuador híbrido, se dispone además de la fuerza generada el motor eléctrico, cuyo propósito es mejorar la precisión del control. El par del motor eléctrico se modela mediante (2).

$$\tau_m = k_i \cdot i_m \cdot R \cdot \eta_r \quad (2)$$

Donde  $k_i$  es la constante de par-corriente del motor (Nm/A);  $i_m$  es la corriente del motor (A),  $R$  es el ratio de la reductora, y  $\eta_r$  es la eficiencia del motor. Como puede apreciarse,  $i_m$  la variable que regula el par ejercido por el motor eléctrico. Cabe destacar que el par máximo que genera el motor eléctrico corresponde al 20 % del par máximo ejercido por la fuerza de propulsión.

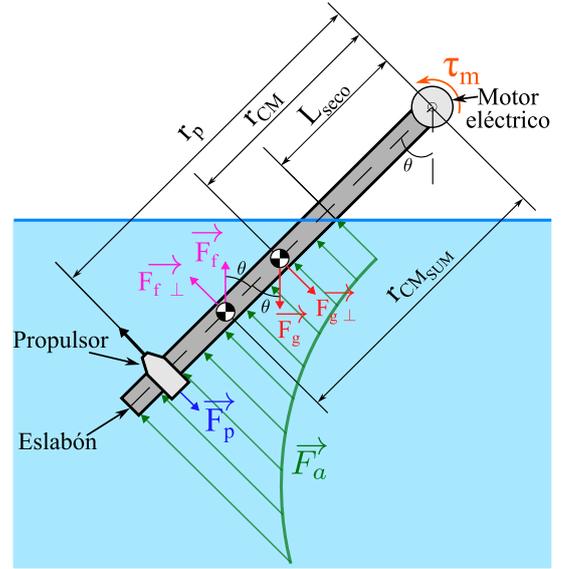


Figura 1: Fuerzas que afectan al eslabón durante el movimiento.  $F_p$ , en azul, es la fuerza producida por los propulsores a una distancia  $r_p$  con respecto al eje de giro.  $F_g$ , en rojo, es la fuerza producida por la gravedad en el centro de masas,  $r_{CM}$ .  $F_f$ , en rosa, es la fuerza de flotación producida en el centro de masas de la parte que esta sumergida,  $r_{CM_{sum}}$ .  $F_a$ , en verde, representa la fuerza de arrastre. Por último,  $\tau_m$ , representado en naranja, es el par producido por el motor eléctrico.

El peso del eslabón también genera un par  $\tau_g$  en función de su posición angular (3).

$$\tau_g = m_e \cdot g \cdot r_{CM} \cdot \sin(\theta) \quad (3)$$

Donde,  $m_e$  es la masa (kg) del motor,  $g$  es la gravedad ( $m/s^2$ ),  $r_{CM}$  es la distancia (m) del centro de masas del eslabón al eje del motor y  $\theta$  es la posición angular del eslabón.

Finalmente, al estar parcialmente sumergido, el modelo también esta sujeto a la fuerza de flotación y la fuerza de arrastre.

El par generado por la fuerza de flotación viene definida en (4). Esta fuerza, opuesta a la gravedad, actúa en el centro de masas de la parte sumergida en el agua.

$$\tau_f = V_{sum} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot r_{CM_{sum}} \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

Donde,  $V_{sum}$  es el volumen del eslabón sumergido en el agua ( $m^3$ ),  $r_{CM_{sum}}$  es la distancia del centro de masas de la parte sumergida con respecto al eje de giro (m).

A causa del movimiento del eslabón se genera una fuerza de arrastre  $F_a$ , en sentido opuesto a la velocidad del eslabón que produce un par de arrastre  $\tau_a$  (5).

$$\tau_a = \int_{L_{seca}}^L \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_{H_2O} \cdot (\omega \cdot r)^2 \cdot r \cdot b \cdot dr \quad (5)$$

La integral queda definida entre  $L$  y  $L_{seca}$ , es decir, la longitud del eslabón que queda sumergida.  $C_d$  es el coeficiente de arrastre, un valor adimensional que describe la resistencia de un objeto al moverse a través de un fluido, y que depende de la forma transversal de contacto entre el eslabón y el fluido,  $w$ , es la velocidad angular,  $r$  es la resta de  $L - L_{seca}$  y  $b$  la base del eslabón.

## 2.2. Montaje experimental

Con objetivo de evaluar tanto el modelo teórico presentado, como la viabilidad del actuador híbrido, se han preparado dos montajes experimentales, estos se muestran en la Figura 2. Ambos se componen de un tanque de agua con circuito cerrado, una bomba propulsora, válvulas de control de caudal y caudalímetros que permiten controlar con precisión el caudal de agua, (Figura 2A). La diferencia entre ambos montajes radica en la funcionalidad: el primero, está diseñado para permitir el movimiento del eslabón con el fin de realizar el control en posición (Figura 2B); el segundo, bloquea el eje de rotación mediante un sensor para llevar a cabo la medición de par (Figura 2C).

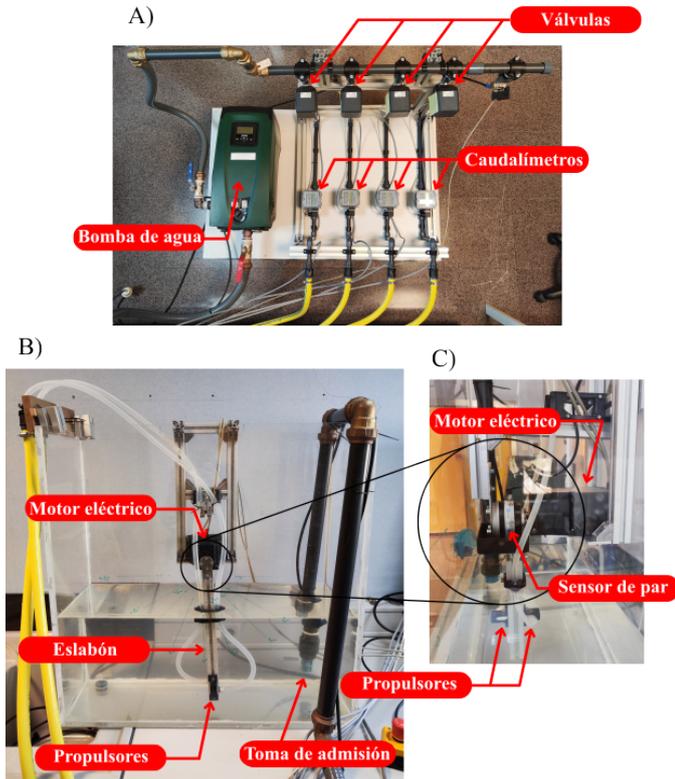


Figura 2: Montaje experimental de actuación híbrida: (A) circuito de agua y control de caudal; (B) eslabón libre con motor y encoder; (C) eslabón bloqueado con sensor de par.

## 2.3. Control del sistema

Para cumplir con los objetivos descritos anteriormente se han evaluado dos modos de actuación diferentes.

El primer modo de actuación se combina la fuerza proporcionada por el sistema de propulsión a chorro junto con la fuerza proporcionada por el motor eléctrico (6).

$$\tau_p + \tau_e - \tau_g + \tau_f - \tau_a = 0 \quad (6)$$

En el segundo modo de actuación, únicamente se utiliza la fuerza proporcionada por el sistema de propulsión a chorro (7).

$$\tau_p - \tau_g + \tau_f - \tau_a = 0 \quad (7)$$

Como se observa en la Figura 3, el sistema de control en posición parte de la comparación continua entre la

consigna angular  $\theta_d$  y la lectura del codificador  $\theta$ . A partir de de la diferencia que existe entre ambos valores, se reparte la acción entre dos actuadores que responden con características distintas: el sistema de propulsión acuática, capaz de suministrar pares elevados de forma sostenida, y el motor eléctrico que dispone de una dinámica mucho más rápida.

En el circuito del sistema de propulsión mediante chorros, el error angular se introduce en un controlador PID externo que genera un par corrector. Al término obtenido se le añaden los pares de gravedad (3), flotabilidad (4) y arrastre (5) calculados a partir del modelo hidrodinámico. De este modo se obtiene el par objetivo que el sistema de propulsión debe alcanzar. Dicho par se traduce en un caudal de referencia mediante el modelo teórico expresado en (1), y se proporciona como referencia directamente a la válvula proporcional, la cual dispone de un control de caudal interno. De este modo, el sistema de propulsión proporciona la componente estacionaria necesaria para mantener la posición deseada frente a perturbaciones lentas.

En paralelo, el motor eléctrico cierra un segundo lazo de control, también basado en un PID que opera sobre la misma medición  $\theta$ . El par que se desea realizar se expresa como una señal de corriente que posteriormente es recibida por el motor. Gracias a su alta velocidad de respuesta el motor es capaz de reducir los errores que el sistema de propulsión no ha podido corregir. Los parámetros de los controladores PID se han ajustado de forma empírica, con el objetivo de minimizar el tiempo de establecimiento, la sobreoscilación y el error en régimen permanente.

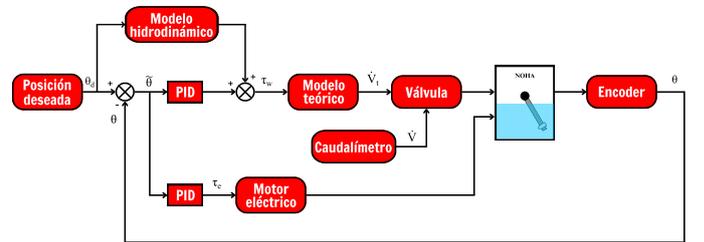


Figura 3: Esquema del control de posición del sistema híbrido.

## 2.4. Procedimiento experimental

Con el fin de probar las distintas facetas del actuador híbrido se llevan a cabo tres experimentos. Todos ellos son realizados configurando la presión de la bomba a 2 bares, el área de los propulsores utilizados es de  $A_p = 25,13mm^2$  y se colocan a una distancia  $r_p = 0,35m$  del eje de giro.

1. El primer experimento se ha diseñado para evaluar y ajustar el coeficiente de resistencia al medio externo ( $C_m$ ), valor del cual depende el modelo teórico que se observa en 1. Para ello, se utiliza el segundo de los montajes en el que se ancla a la altura del eje de rotación un sensor de par como se muestra en la Figura 2C. Se envían señales escalón a las válvulas con amplitudes comprendidas entre 5 L/min y 23 L/min. Cada señal tiene una duración de 60 segundos y se repiten 5 veces para cada caudal. Los datos obtenidos se suavizan, filtran y

agrupan en función del caudal. Finalmente, se utiliza el método de mínimos cuadrados para comparar los datos experimentales con el modelo teórico.

2. El segundo experimento se realiza para evaluar la respuesta del sistema ante un control en par, empleando el segundo montaje, donde se busca comparar el control híbrido y un control que utiliza únicamente los propulsores de agua. Se aplican 10 señales de tipo escalón para cada control, posteriormente se agrupan los resultados para calcular la media y la desviación estándar en cada punto.
3. En el último experimento, se evalúa el comportamiento del sistema ante un control posicional, comparando de nuevo el control híbrido y el control mediante propulsión. Para llevar este experimento a cabo se usa el primer montaje, permitiendo la libertad de movimiento del eslabón (Figura 2B). Se implementan 10 señales escalón para cada control, cuyos resultados son agrupados con el propósito de calcular la media y la desviación estándar.

### 3. Resultados

#### 3.1. Evaluación del modelo teórico

En la figura 4 se muestra la relación entre el caudal de agua y el par generado en el sistema. El incremento de caudal de  $5,0L/min$  a  $23,0L/min$ , provoca un aumento en el par medido, que pasa de  $0,056Nm$  a  $1,239Nm$ . Una vez realizado el ajuste del coeficiente de resistencia al medio externo ( $C_m$ ) mediante el método de mínimos cuadrados se obtiene un valor de  $C_m = 0,74$ .

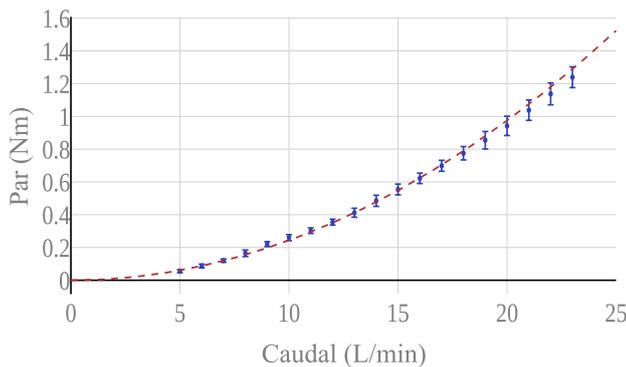


Figura 4: Comparación entre el modelo teórico (rojo) y los datos reales medidos por el sensor de par y los caudalímetros (azul). En esta figura el modelo teórico está ajustado para  $C_m = 0,74$

#### 3.2. Control de par

En la figura 5, se compara la respuesta de la actuación por propulsión a chorro (representada por la curva de color azul) y la del actuador híbrido (representada por la curva de color rojo), ante una entrada escalón de  $1.0 Nm$  de  $60$  segundos de período.

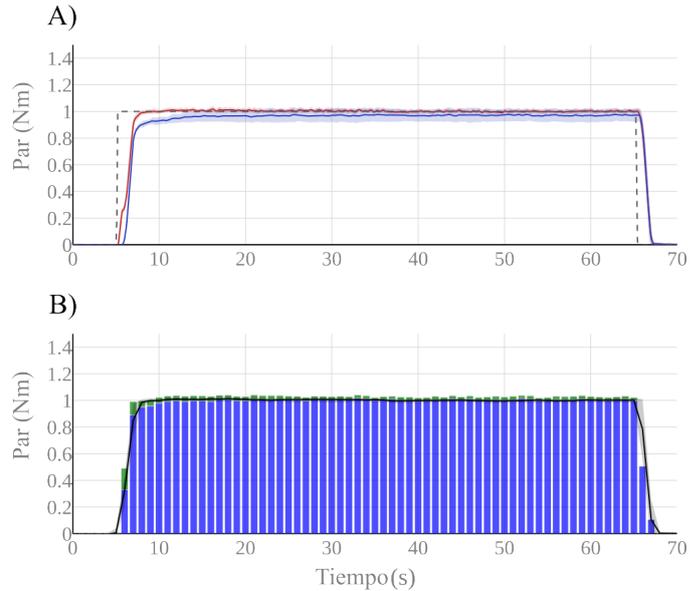


Figura 5: (A) Comparación ante entrada escalón de la respuesta del sistema con el control de propulsión a chorro (azul) y la actuación híbrida (roja). (B) Para la actuación híbrida, comparativa entre el par aportado por los propulsores (azul) y el par aportado por el motor eléctrico (en verde si es en el mismo sentido que la propulsión a chorro y en rojo en el sentido contrario).

En la Figura 5A se representa en rojo la respuesta del control híbrido y en azul la respuesta del control mediante propulsores de microchorros. En esta se observa como, en el caso del control mediante propulsores, el tiempo de retardo es de  $1,7s$ , tiempo de establecimiento es de  $7,4s$  y cuenta con un error medio en régimen permanente del  $3,03\%$ . Por otro lado, en la actuación híbrida, el tiempo de retardo es de  $1,4s$ , el tiempo de establecimiento es de  $2,2s$  y el error medio en régimen permanente es de  $0,48\%$ .

La Figura 5B muestra la comparación durante la actuación híbrida de la contribución de los propulsores de agua (azul), y la contribución del motor eléctrico, mostrando en color verde esta contribución se produce en el mismo sentido, o en rojo, si es en sentido contrario. Como se evidencia en la gráfica, la contribución al par proviene principalmente de los propulsores, mientras que el motor eléctrico se manifiesta principalmente en la subida y, en menor medida, en el régimen permanente.

#### 3.3. Control de posición

Como se observa en la Figura 6, se compara la respuesta del sistema para ambos modos de control. En la Figura 6A se muestra en rojo la respuesta del control híbrido y en azul la respuesta del sistema cuando actúa exclusivamente con los chorros de agua. En la Figura 6B, se muestra el par teórico que realizan tanto la propulsión a chorro (las barras azules) como el motor eléctrico (las barras verdes para marcar en el mismo sentido y las rojas para indicar que el par se hace en el sentido opuesto) durante el control híbrido.

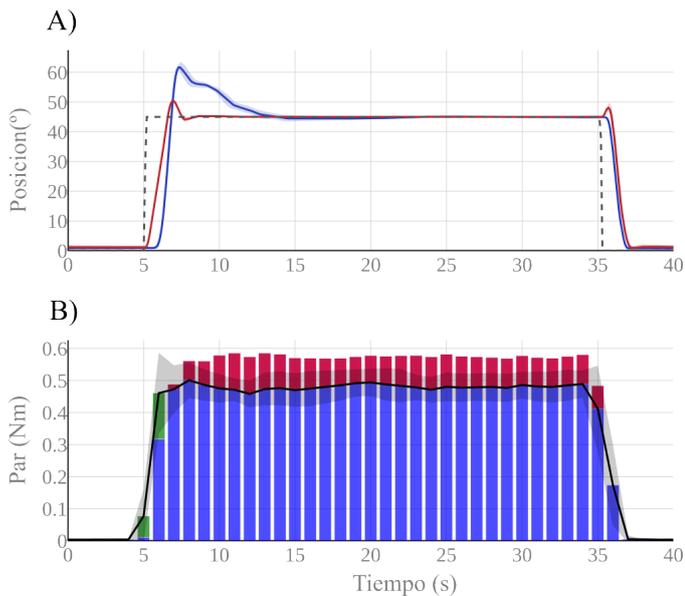


Figura 6: (A) Comparación ante entrada escalón de la respuesta del sistema con el control de propulsión a chorro (azul) y la actuación híbrida (roja). (B) Para la actuación híbrida, comparativa entre el par aportado por los propulsores (azul) y el par aportado por el motor eléctrico (en verde si es en el mismo sentido que la propulsión a chorro y en rojo en el sentido contrario)..

Se puede observar que para el control híbrido, el tiempo de retardo es de  $1,0s$ , el tiempo de pico es de  $1,9s$ , el tiempo de establecimiento es de  $2,4s$ ; además, cuenta con una sobreoscilación del  $11,76\%$  y con un error en régimen permanente del  $0,14\%$ . En el caso del control por propulsores, el tiempo de retardo es de  $1,5s$ , el tiempo de pico es de  $2,4s$ , el tiempo de establecimiento corresponde a  $7,6s$ ; por último, presenta una sobreoscilación del  $37,02\%$  y un error en régimen permanente del  $0,51\%$ .

## 4. Discussion

### 4.1. Evaluación modelo teórico

El valor obtenido de  $C_m$  indica que el sistema experimenta una resistencia significativa al expulsar el agua en un medio acuático, lo que reduce la eficiencia en la generación de fuerza en comparación con la expulsión en un medio menos denso, como el aire. Este resultado es consistente con lo esperado en sistemas reales.

En conclusión, los resultados de las pruebas realizadas validan el modelo teórico que establece la relación entre el par y el caudal. Además, el valor de  $C_m$  obtenido proporciona una métrica cuantitativa de la resistencia al medio externo. Por lo tanto, realizar este ajuste es esencial para el control del sistema.

### 4.2. Control de par

Los resultados obtenidos evidencian que la actuación híbrida exhibe una respuesta más veloz y precisa en comparación con la propulsión a chorro. Específicamente, el tiempo de retardo y el tiempo de subida son menores en la configuración híbrida ( $1,4s$  y  $2,1s$ , respectivamente) en comparación con la propulsión a chorro ( $1,7s$  y  $3,0s$ ), lo que

sugiere una mayor agilidad del sistema híbrido al responder ante cambios en la entrada.

Además, se observa una reducción significativa en el tiempo de establecimiento con la implementación de la actuación híbrida ( $2,2s$  frente a  $7,4s$ ), lo que sugiere una mayor estabilidad y rapidez para alcanzar el estado estacionario. Por último, el error en régimen permanente es considerablemente menor en la configuración híbrida ( $0,48\%$ ) en comparación con la propulsión a chorro ( $3,03\%$ ), lo que evidencia una mayor precisión en el seguimiento de la referencia deseada. Estos resultados indican que la implementación de una actuación híbrida mejora el desempeño dinámico del sistema, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la precisión en el estado estacionario.

### 4.3. Control de posición

En este caso, los resultados también reflejan que el sistema de actuación híbrida es más rápido y preciso que usar únicamente el sistema de propulsión. Por ejemplo, el tiempo de retardo se reduce de  $1,5s$ , cuando solo actúa el sistema de propulsión de agua, a  $1,0s$  cuando lo hace el control híbrido, también varía el tiempo de pico, de  $2,4s$  a  $1,9s$  respectivamente. De forma particularmente notable, el tiempo de establecimiento se acorta de  $7,6s$  a  $2,4s$ , lo que permite que el sistema alcance el valor de referencia en un tiempo considerablemente menor. Además, se observa que la sobreoscilación disminuye a  $11,76\%$  con respecto a los  $37,02\%$  que se ha medido para el control por propulsión, y el error en régimen permanente se reduce a  $0,14\%$  para el control híbrido mientras que en el control por propulsión de agua el error es de  $0,51\%$ .

Estos resultados evidencian que la incorporación del motor eléctrico en la configuración híbrida no solo agiliza la respuesta del sistema, sino que también mejora su estabilidad y precisión final. Esta optimización en los parámetros transitorios y en el error en estado estacionario respalda la eficacia del enfoque híbrido para aplicaciones que requieren una rápida convergencia y un seguimiento preciso de la referencia.

## 5. Conclusiones

En este artículo se han presentado los primeros resultados obtenidos de un estudio de viabilidad de un nuevo sistema de actuación híbrido diseñado para funcionar en entornos subacuáticos. En primer lugar, se ha formulado el modelo teórico desarrollado para el análisis del comportamiento de este nuevo actuador. Y a continuación, se han preparado dos montajes experimentales con los que evaluar el modelo teórico en términos de par, y el control en posición empleado en este nuevo actuador.

La evaluación inicial del actuador híbrido subacuático parece demostrar su viabilidad técnica y funcional para aplicaciones en rehabilitación robótica en el agua, destacando su capacidad de generar movimientos controlados y seguros. La combinación de actuadores neumáticos y eléctricos aporta flexibilidad y adaptabilidad al tratamiento, aunque persisten retos técnicos como la integración mecánica, la estanqueidad y la eficiencia energética.

Dicho esto, actualmente el estudio continúa en desarrollo, por lo que los resultados presentados aún son muy preliminares. Aunque es cierto que los resultados muestran el potencial de este nuevo actuador, aún es pronto para sacar conclusiones claras.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por: la Conselleria de Educación, Cultura, Universidades y Empleo de la Comunidad Valenciana a través de la ayuda CIPROM/2022/12 y la Agencia Estatal de Investigación a través de los proyectos PDC2022-133622-I00 y PID2022-139957OB-I00.

## Referencias

Forbrigger, S., DePaul, V. G., Davies, T. C., Morin, E., Hashtrudi-Zaad, K., 2023. Home-based upper limb stroke rehabilitation mechatronics: challenges and opportunities. *BioMedical Engineering OnLine* 22 (1), 67. DOI: 10.1186/s12938-023-01133-8

Huang, Y., Yang, B., Wong, T. W.-L., Ng, S. S. M., Hu, X., 2024. Personalized robots for long-term telerehabilitation after stroke: a perspective on technological readiness and clinical translation. *Frontiers in Rehabilitation Sciences Volume 4 - 2023*. DOI: 10.3389/fresc.2023.1329927

Kiyono, K., Tanabe, S., Hirano, S., Ii, T., Nakagawa, Y., Tan, K., Saitoh, E., Otaka, Y., 2024. Effectiveness of robotic devices for medical rehabilitation: An umbrella review. *Journal of Clinical Medicine* 13 (21). DOI: 10.3390/jcm13216616

Lozano-Puertas, J., Torres-Sánchez, I., Cabrera-Martos, I., Ortiz-Rubio, A., López-López, L., Valenza, M. C., 2018. Efectividad de la terapia acuática en pacientes con accidente cerebrovascular: una revisión sistemática. *Fisioterapia* 40 (5), 265–272. DOI: 10.1016/j.ft.2018.04.001

Mehrholz, J., Pollock, A., Pohl, M., Kugler, J., Elsner, B., 2020. Systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials of robotic-assisted arm training for improving activities of daily living and upper limb function after stroke. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 17 (83), 1–14. DOI: 10.1186/s12984-020-00715-0

Palladino, L., Ruotolo, I., Berardi, A., Carlizza, A., Galeoto, G., 2023. Efficacy of aquatic therapy in people with spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Spinal Cord* 61 (6), 317–322. DOI: 10.1038/s41393-023-00892-4

Qu, P., Wang, H., Wang, W., Du, S., Peng, Z., Hu, Q., Tang, X., 2023. Efficacy and safety of duhuo-jisheng decoction in rheumatoid arthritis: A systematic review and meta-analysis of 42 randomized controlled trials. *Medicine* 102 (44), e35513. DOI: 10.1097/MD.00000000000035513

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022. *World population prospects 2022: Summary of results*. DESA/POP/2022/TR/NO. 3., isbn: 978-92-1-148373-4.

Wang, H., Wu, X., Li, Y., Yu, S., 2024. Efficacy of robot-assisted training on upper limb motor function after stroke: A systematic review and network meta-analysis. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, 100387. DOI: 10.1016/j.arrct.2024.100387

Xiang, A., Fu, Y., Wang, C., Huang, D., Qi, J., Zhao, R., Wu, L., Fan, C., Zhang, Q., 2024. Aquatic therapy for spastic cerebral palsy: a scoping review. *European Journal of Medical Research* 29 (1), 569. DOI: 10.1186/s40001-024-02171-1

Zanatta, F., Giardini, A., Pierobon, A., D'Addario, M., Steca, P., 2022. A systematic review on the usability of robotic and virtual reality devices in neuromotor rehabilitation: patients' and healthcare professionals' perspective. *BMC health services research* 22 (1), 523.