

Jornadas de Automática

Validación Preliminar de una Arquitectura Modular para el Control de un Sistema de Asistencia Robótico Bimanual.

Peral-Sempere, E.^{a,*}, Vales, Y.^a, Rubira-Úbeda, P.^a, Martínez-Pascual, D.^a, Catalán, J.M.^b, Garcia-Aracil, N.^a

^aGrupo de Robótica e Inteligencia Artificial, Instituto de Bioingeniería de Elche, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España

^bDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España

To cite this article: Peral-Sempere, E., Vales, Y., Rubira-Úbeda, P., Martínez-Pascual, D., Catalán, J.M., Garcia-Aracil, N. 2026. Preliminary Validation of a Modular Architecture for the Control of a Bimanual Assistive Robotics System. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13755>

Resumen

El accidente cerebrovascular representa una de las principales causas de discapacidad física crónica, dejando una gran parte de los supervivientes con secuelas de déficits motores severos en los miembros superiores que limitan su autonomía. Ante la necesidad de restaurar esta independencia funcional, el presente estudio propone el desarrollo y validación preliminar de una plataforma robótica de asistencia bimanual diseñada para tareas de la vida diaria, específicamente la tarea de vertido de líquidos y su posterior ingesta. En la propuesta se integran dos exoesqueletos de brazo y dos de mano, coordinados mediante una arquitectura basada en una máquina de estados. Para aprovechar las capacidades residuales del usuario, el sistema combina el *eyetracking* con una BCI que permite al usuario tener cierto control sobre el sistema.

Palabras clave: Ingeniería de rehabilitación y prestación de servicios de salud, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica, Control compartido, cooperación y grado de automatización, Automatización centrada en el ser humano.

Preliminary Validation of a Modular Architecture for the Control of a Bimanual Assistive Robotics System

Abstract

Stroke represents one of the leading causes of chronic physical disability, leaving a large proportion of survivors with severe motor deficits in the upper limbs that limit their autonomy. Driven by the need to restore this functional independence, this study proposes the development and preliminary validation of a bimanual assistive robotic platform designed for activities of daily living, specifically liquid pouring and subsequent ingestion. The proposal integrates two arm and two hand exoskeletons, coordinated through a finite-state machine architecture. To leverage the user's residual capabilities, the system combines eye-tracking with a Brain-Computer Interface (BCI), allowing the user to maintain shared control over the system.

Keywords: Rehabilitation engineering and healthcare delivery, Assistive technology and rehabilitation engineering, Robotics technology, Shared control, cooperation and degree of automation, Human centred automation.

1. Introducción

En la Unión Europea, aproximadamente 1,1 millones de personas conviven con las secuelas del accidente cerebrovas-

cular (ictus), consolidándose como una de las principales causas de discapacidad física crónica en adultos a nivel global (Tsao et al., 2023; Pu et al., 2023; Wafa et al., 2020). El 80 %

*Autor para correspondencia: esther.perals@umh.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

de los supervivientes presenta déficits motores en los miembros superiores, una limitación que no solo supone un impedimento físico, sino que representa un gran impacto en el bienestar psicológico y la autoestima. La pérdida de autonomía y la consecuente dependencia de terceros para realizar Actividades de Vida Diaria (AVD) reducen drásticamente su calidad de vida y aumenta el riesgo de aislamiento social.

En este contexto, aunque la rehabilitación convencional mitiga ciertos déficits, suele ser insuficiente para restaurar la función motora en el caso de parálisis severa. Para subsanar estas limitaciones, el desarrollo de tecnologías de asistencia avanzadas resulta fundamental. Estas herramientas no solo buscan eliminar barreras del entorno, sino que además promueven la autonomía funcional siguiendo el marco de la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y la Salud (CIF) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (World Health Organization, 2001), que prioriza el potencial de funcionamiento sobre la limitación física.

Para maximizar esta autonomía, el sistema propuesto en este documento aprovecha las capacidades residuales del usuario mediante la combinación de dos modos de interacción para el control de un exoesqueleto de asistencia bimanual. En primer lugar, se emplea una *Brain-Computer Interface* (BCI) con el objetivo de traducir la actividad cerebral vinculada con la imaginación motora en movimientos reales de actuadores externos, restableciendo así el enlace entre la intención motora y la ejecución física. En segundo lugar, se integra una *Human-Machine Interface* (HMI) basada en *eye-tracking*, que dota al usuario de control sobre el sistema.

Este documento describe la integración de estos componentes en el sistema robótico de asistencia mediante una arquitectura basada en una máquina de estados, diseñada para coordinar la tarea de beber agua. Se detalla tanto el diseño de dicha máquina de estados como la lógica de coordinación entre elementos. Finalmente, se presenta una evaluación preliminar del funcionamiento del sistema mediante una prueba de ejecución de un ciclo completo con varios usuarios.

2. Materiales y Métodos

2.1. Arquitectura Multimodal

Con el objetivo de obtener un sistema capaz de asistir de manera eficaz en las AVD, se ha diseñado una arquitectura multimodal orientada al uso de las capacidades residuales del usuario. El usuario controla el sistema mediante seguimiento ocular y señales encefalográficas (EEG) para realizar la tarea de verter agua sobre un vaso y beber. El sistema diseñado queda compuesto por:

- Un sistema encargado de la detección y localización de los objetos a manipular.
- Un sistema de Realidad Aumentada (RA) mediante el cual el usuario interactúa con el sistema a través del *eye-tracking*.
- Un sistema robótico bimanual destinado a asistir los movimientos del usuario de manera coordinada.

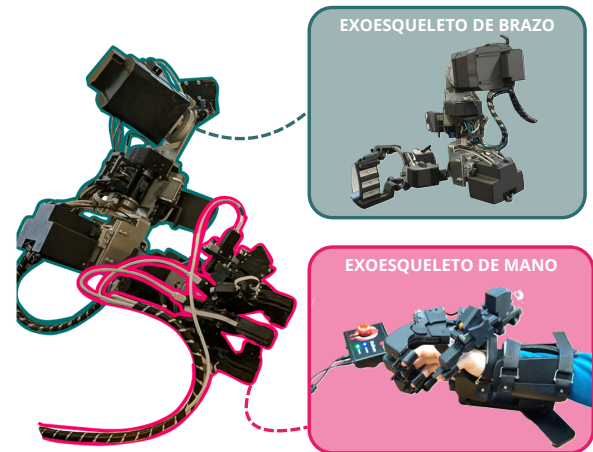


Figura 1: Exoesqueleto bimanual empleado, compuesto por un exoesqueleto de brazo y uno de mano.

2.2. Exoesqueleto Bimanual

El sistema bimanual está compuesto por dos exoesqueletos de mano y dos exoesqueletos de brazo (Figura 1).

Los exoesqueletos de brazo cuentan con 5 grados de libertad (GdL) actuados mediante motores Maxon, que replican la cinemática del brazo humano: abducción/aducción, flexión/extension y rotación del hombro, junto con la flexión/extension del codo y la pronosupinación. Para garantizar la alineación de los ejes mecánicos con los del usuario, el diseño incorpora mecanismos de ajuste y una articulación libre. El sistema se acopla al cuerpo mediante órtesis con cinchas de velcro.

El exoesqueleto de mano Helium (Diez et al., 2018) dota al sistema de la posibilidad de agarrar objetos incorporando los movimientos de apertura y cierre. Cada unidad permite el control independiente de los tres primeros dedos, mientras que el cuarto y el quinto se encuentran mecánicamente unidos. Este módulo se integra al brazo a través del carril situado en el extremo distal de la articulación libre, la cual actúa como elemento de unión entre ambos sistemas.

El exoesqueleto bimanual completo se gestiona mediante un PC de control en el cual se centraliza la ejecución de los nodos de ROS2 y se procesa la información proveniente de otros componentes.

2.3. Sistema de Visión por Computador y Estimación de la Mirada

El control general del exoesqueleto se comanda desde una HMI desarrollada en el motor Unity, la cual integra el paquete *Mixed Reality Toolkit* (MRTK) que permite gestionar la mirada, los gestos y los comandos de voz. Esta interfaz se ejecuta en las gafas de RA Microsoft HoloLens 2, aprovechando su capacidad de procesamiento para combinar el seguimiento ocular nativo con un sistema de detección de objetos basado en el algoritmo YOLOv8. Gracias a esta integración, el usuario puede interactuar con su entorno de forma intuitiva, seleccionando mediante la fijación de la mirada los objetos específicos que desea alcanzar o manipular con el sistema robótico, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Visualización en RA durante el proceso de selección de un objeto interactivo y despliegue de información al usuario. Durante la selección, el color del texto del botón cambia a “cian”.

Paralelamente, se emplea una cámara RGB-D ORBBEC Astra que utiliza el mismo modelo de detección de objetos para dotar al sistema de la información del entorno necesaria durante la ejecución de la tarea. Este sensor permite identificar los elementos del entorno y calcular su posición tridimensional respecto al origen de coordenadas del robot.

2.4. BCI

Las señales de EEG se registran mediante el amplificador inalámbrico de 9 canales LiveAmp (Brain Products GmbH, Gilching, Alemania). Para la captación, se emplean electrodos con gel sólido dispuestos sobre el cuero cabelludo siguiendo el Sistema Internacional 10-20, específicamente en las posiciones F3, F4, T7, T8, C3, C4, Cz, P3 y P4.

El proceso de adquisición se realiza con una frecuencia de muestreo de 1 kHz, aplicando posteriormente un filtro paso-banda entre 0.1 y 30 Hz para limpiar la señal. Para el procesamiento de datos en tiempo real y la conversión de estas señales en comandos de control para los exoesqueletos de mano, se implementa una versión personalizada del BCI2000 (Schalk et al., 2004; Soekadar et al., 2016). Esta interfaz permite una integración fluida entre la actividad neuronal detectada y la respuesta mecánica del dispositivo robótico.

2.5. Máquina de Estados

El desarrollo de la máquina de estados se ha implementado utilizando los *Workflows* de LlamaIndex (Liu and Contributors, 2024), cuya arquitectura basada en eventos simplifica la lógica frente a las herramientas tradicionales de ROS2. La lógica de la máquina de estados se implementa como un nodo de ROS2 para poder acceder y enviar información a todo el sistema. Este nodo llamado *FSMWorkflowNode* es el núcleo de la integración de todos los elementos, donde se coordina la ejecución de la tarea de beber agua, la cual se divide en 15 estados cada uno dedicado a una acción. Estos estados se agrupan en las siguientes fases:

- **Fase de Inicio.** El ciclo inicia verificación de seguridad, mediante la cual se verifica el estado de los exoesqueletos de brazo y mano. Una vez validados, los exoesqueletos se colocan en una posición neutral de espera y las manos se abren. Tras alcanzar este estado de reposo se

notifica al sistema que coordinan las gafas de RA que el sistema se encuentra listo para la interacción.

- **Fase 1: Selección del Objeto.** El sistema robótico entra en un estado de espera hasta que el usuario seleccione el objeto. En este momento la interfaz de las HoloLens se actualiza mostrando las etiquetas de los objetos detectados facilitando la selección mediante *eyetracking*.
- **Fase 2: Localización y Agarre del Vaso.** Si se selecciona el vaso, se activa el flujo de brazo izquierdo. El brazo izquierdo ejecuta la trayectoria calculada por el planificador. El cierre del efector final está condicionado por la validación del usuario mediante el sistema BCI y ante la ausencia de señal, el movimiento se detiene. Al final de esta fase se comprueba si ambos objetos se encuentran agarrados. Si esta verificación es positiva, se progresa a la Fase 4, en caso contrario, se retorna a la selección de objetos de la Fase 1.
- **Fase 3: Localización y Agarre de la Botella.** Este flujo es análogo al de la Fase 2, pero ejecutado por los exoesqueletos derechos. El sistema calcula la trayectoria, ejecuta el acercamiento y realiza el agarre condicionado por la BCI, retornando finalmente a la posición de reposo, y verificando si se puede pasar a la siguiente Fase.
- **Fase 4: Vertido del contenido.** En esta fase se ejecuta una secuencia de movimientos predefinidos para verter el contenido de la botella sobre el vaso. El brazo izquierdo posiciona el vaso frente al usuario mientras que el brazo izquierdo inclina la botella para verter el contenido. Al completarse el llenado, la botella se retira a la posición de reposo.
- **Fase 5: Acción de Beber.** Al igual que en la fase anterior, en esta fase se ejecuta una secuencia de movimientos predefinidos diseñada esta vez para asistir en la tarea de beber. El brazo izquierdo acerca el vaso a la boca del usuario y, tras completar la tarea, los brazos retornan a la posición de reposo.
- **Fase 6: Retorno de la Botella.** En esta fase, el sistema transporta la botella a su ubicación original. La apertura de la mano para liberar el objeto requiere, nuevamente, la validación activa del usuario a través de la señal BCI, garantizando que el objeto no se suelte de forma involuntaria.
- **Fase 7: Retorno del Vaso.** De manera análoga a la fase anterior, se procede a devolver el vaso a su posición inicial bajo control del BCI. Una vez liberado, el flujo retorna a la Fase de Inicio, situando ambos exoesqueletos en configuración neutral y quedando a la espera de un nuevo comando.

El flujo de trabajo resultante completo se detalla en la Figura 3. En esta se representan las 8 Fases que componen la máquina de estados.

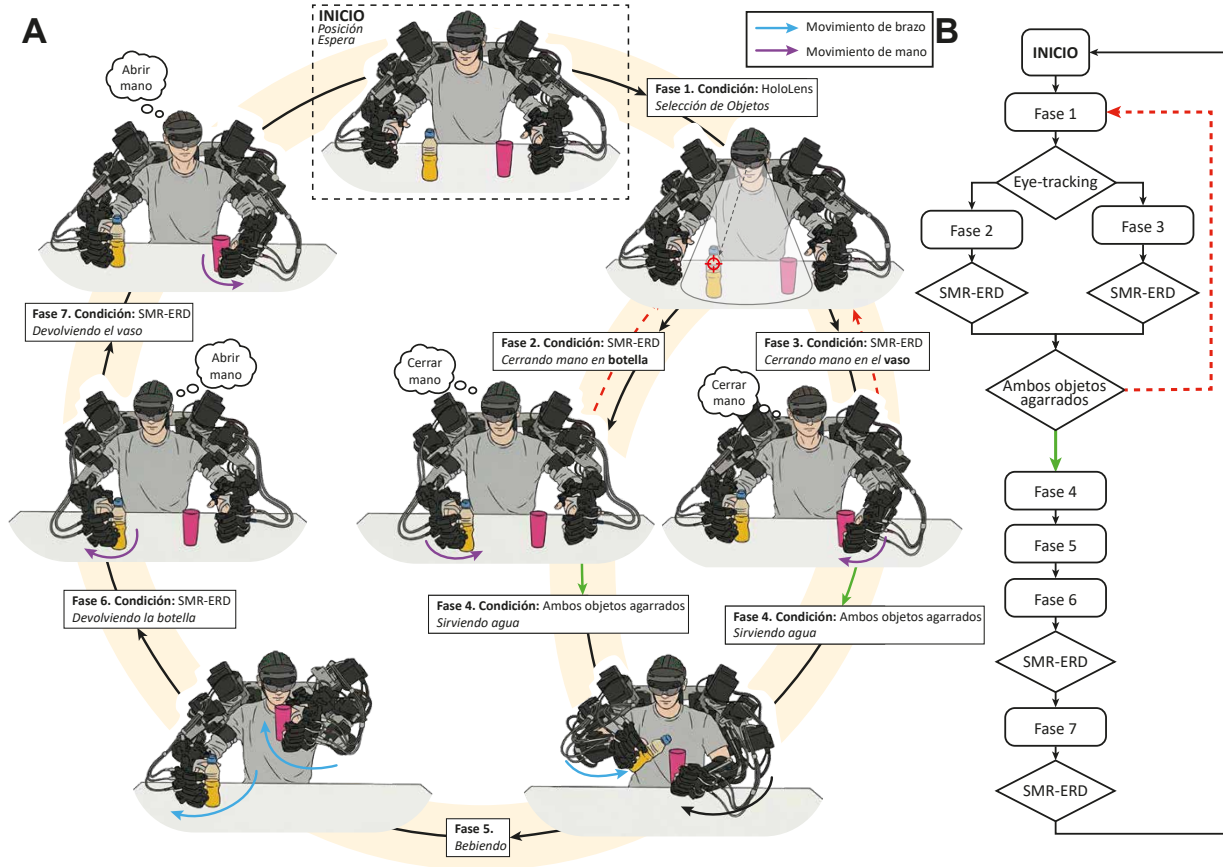


Figura 3: Estrategia de control robótico bimanual humano-compartido basada en una máquina de estados finitos para la tarea de vertido, activada por EEG y rastreo ocular. **A.** Estrategia de control. **B.** Diagrama de flujo del bucle de control del exoesqueleto bimanual de brazo completo..

2.6. Arquitectura y Flujo de Comunicación

El sistema opera bajo una arquitectura donde el nodo de la máquina de estados FSMWorkflowNode centraliza el intercambio de datos entre los elementos del sistema.

La arquitectura de control de los exoesqueletos de brazos se fundamenta en ROS2, el cual, además de facilitar la integración en el resto de elementos del sistema, gestiona la comunicación entre los niveles de planificación y ejecución. Para la generación de trayectorias, se ha integrado Moveit2, utilizando el planificador de trayectorias PILZ. Esta integración permite calcular trayectorias libres de colisiones, teniendo en cuenta las restricciones cinemáticas y los límites articulares mecánicos definidos en un modelo URDF del robot.

La ejecución de las trayectorias se gestiona a través de ROS2 Control, que actúa como una capa que separa la lógica del hardware. Se implementan controladores de tipo Joint Trajectory Controller que reciben los puntos de trayectoria calculados por el planificador y los traducen en señales a enviar a cada uno de los motores del exoesqueleto.

Para la gestión de los exoesqueletos de mano, se ha implementado un nodo dedicado que integra las señales EEG en el control. Este módulo garantiza que la activación del movimiento de cierre/apertura de mano se sincronice con la intención del usuario. El movimiento de los actuadores progresa únicamente bajo la detección continua de la Desincronización Relacionada con Eventos (ERD) de la BCI. Ante la ausencia de esta señal el sistema interrumpe el movimiento de los exoesqueletos. El exoesqueleto mantendrá este estado de recep-

ción de señales de la BCI hasta lograr la apertura o el cierre completo.

Gracias a que el control de los exoesqueletos de brazos y manos se ha implementado íntegramente en ROS2, se comanda las trayectorias necesarias para interactuar con los objetos y completar la tarea desde la máquina de estados y esta recibe información de este para determinar si una tarea ha sido completada.

La interacción con la interfaz de RA se integra en ecosistema de ROS2 mediante un puente UDP. A través de este canal se reciben los comandos de selección de objetos y señales de inicio de tarea. A su vez, la máquina de estados publica en este canal el estado actual para mostrar esta información al usuario en la interfaz en tiempo real.

Por último para la localización, el sistema utiliza la biblioteca tf2 de ROS2, donde el sistema de visión publica dinámicamente las coordenadas de todos los objetos detectados mediante YOLO a través de la cámara. El planificador consulta el árbol de transformadas en el momento donde la máquina de estados se encuentra en el cálculo de trayectoria, transformando las coordenadas del objeto al sistema de referencia.

Las comunicaciones quedan representadas de manera gráfica en la Figura 5.

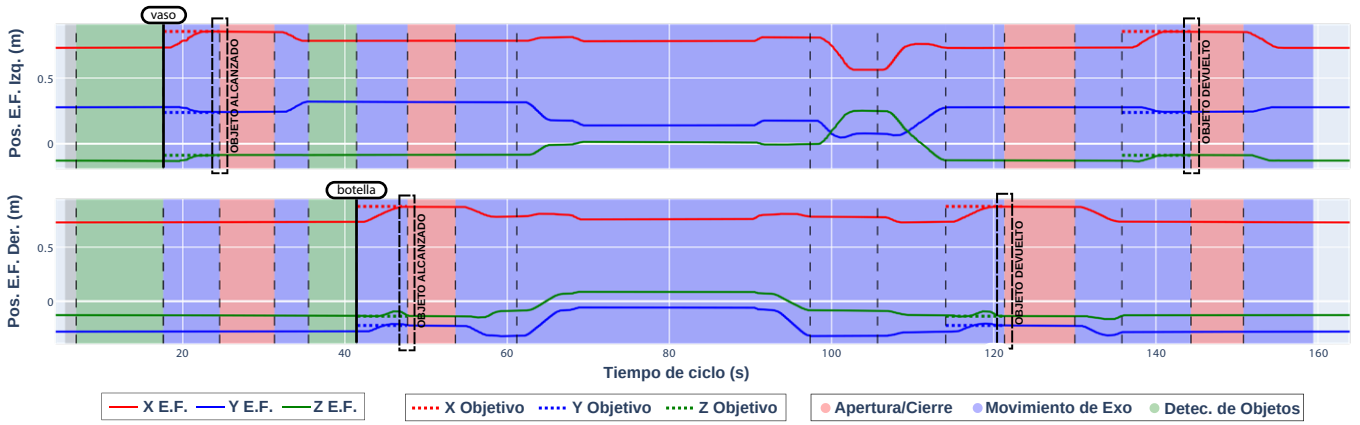


Figura 4: Perfil temporal de la ejecución de la tarea y transiciones de la FSM junto con la evolución de las coordenadas de los efectores finales.

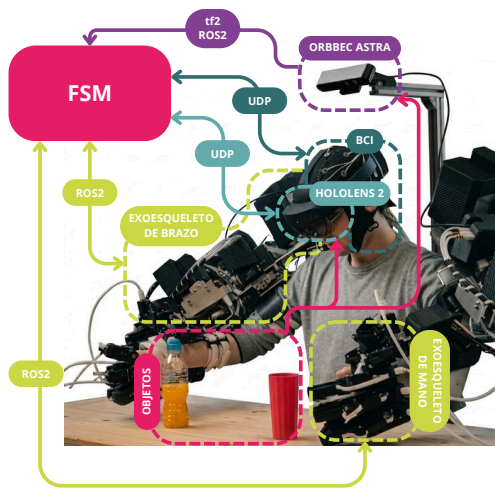


Figura 5: Flujo de comunicación del sistema. Se detalla la interconexión entre la Finite State Machine (FSM) y los módulos de percepción (Orbbec Astra), interacción (HoloLens 2, BCI) y actuación (exoesqueletos de brazo y mano) mediante protocolos ROS2 y UDP.

2.7. Setup Experimental y Protocolo

El protocolo experimental consiste de tres fases principales: la calibración de la interfaz de control mediante EEG, la preparación y colocación de los exoesqueletos seguida de la fase experimental.

En la fase de calibración, los participantes son sentados frente a una pantalla donde se les indica que deben alternar entre estados de relajación e imaginación motora. A partir de una serie de ensayos siguiendo estas condiciones, se determina el umbral con el que se clasifica las señales correspondientes a ERD. Este procedimiento se fundamenta en metodologías de estudios previos (Catalán et al., 2023; Nann et al., 2020).

El sistema robótico bimanual se prepara, se enciende y se inicializa para posteriormente hacer un proceso de *homing*. Se establece la conexión UDP tanto con el sistema de RA como con el BCI. Una vez inicializado se procede a la fase experimental.

Durante la fase experimental, los participantes son sentados frente a una mesa y equipados con el exoesqueleto, el sistema BCI y las gafas de RA. Asimismo, se coloca la cámara sobre el usuario para capturar el espacio de trabajo. Una vez

el sistema se encuentra listo, se pide al usuario completar un ciclo de ejecución de la máquina de estados.

Al finalizar la fase experimental, con el fin de capturar las experiencias subjetivas, se evalúa el estado afectivo de los participantes mediante el *Self-Assessment Manikin* (SAM). Esta evaluación permite cuantificar la respuesta emocional de los usuarios a través de una escala pictórica de nueve puntos en tres ejes emocionales fundamentales: la valencia, la activación y la dominancia.

El grupo de participantes está compuesto por cuatro usuarios sanos, de entre 23 y 32 años, sin experiencia previa en el uso de sistemas BCI. Todos recibieron información detallada sobre los procedimientos de la experimentación y otorgaron su consentimiento informado.

3. Resultados y Discusión

3.1. Evaluación del Sistema de Control

El comportamiento del sistema tras ejecutar un ciclo completo para uno de los usuarios es el que se detalla en la Figura 4. Este gráfico representa la evolución temporal de las coordenadas espaciales de ambos efectores finales durante un ciclo completo de la tarea de asistencia. Esta representación permite validar de manera preliminar la ejecución secuencial de la máquina de estados y respuesta del sistema ante los comandos de control recibidos por las interfaces.

El estado de la máquina se representa en el color de fondo de la gráfica. Las fases de percepción (verde) representan los periodos de detección y selección de objetos, donde el sistema permanece a la espera de la interacción del usuario mediante *eyetracking*. Las fases que implican movimiento de los exoesqueletos de brazo se representan en azul. La interacción mediante BCI se muestra en rojo en aquellos estados en los que se ejecuta el cierre/apertura de las manos mediante señales EEG.

Al analizar la gráfica obtenemos que, durante las maniobras de aproximación, las coordenadas reales del effector final convergen hacia los objetivos calculados (líneas punteadas). El evento de “objeto alcanzado” se activa de manera efectiva cuando el error de posición se encuentra por debajo del umbral de tolerancia establecido.

Asimismo, los resultados demuestran una integración eficaz de las interfaces de control. La recepción de comandos a

través del canal UDP y la detección de señales BCI activan las transiciones inmediatas entre estados.

3.2. Evaluación de la BCI

Cada usuario completa cuatro estados de control mediante EEG (agarre/devolución de vaso y botella), resultando en un total de 16 estados evaluados. El rendimiento de la BCI se cuantifica mediante el tiempo de inicialización (*Time To Initialize*, TTI), siguiendo la metodología de estudios previos (Catalán et al., 2023; Crea et al., 2018).

Los resultados detallados de cada usuario y acción se representan en la Tabla 1. Del análisis de estos datos se observa una alta variabilidad tanto entre los usuarios como entre los resultados de un mismo usuario. Si bien la arquitectura es eficaz para la mayoría de casos, factores como la fatiga cognitiva o la falta de experiencia previa con imaginería motora pueden influir en el rendimiento.

Tabla 1: TTIs para cada usuario y acción.

Usuario	Cierre Izq.	Cierre Der.	Apert. Der.	Apert. Izq.
1	2.16 s	0.39 s	3.99 s	2.46 s
2	9.67 s	11.42 s	1.96 s	2.74 s
3	1.03 s	0.53 s	0.49 s	0.05 s
4	2.99 s	8.96 s	36.27 s	6.05 s

No obstante, la mediana del TTI se sitúa en 2.60 s, con un rango intercuartílico comprendido entre 0.78 s y 7.50 s. Esto se traduce en que, en términos generales, los participantes fueron capaces de iniciar los movimientos y mantener la activación del ERD. Aunque se registran tiempos de hasta 11.42 s, el TTI se encuentra típicamente por debajo de 7.5 s. Aunque el 67.75 % de los ensayos se sitúan por debajo de los 6 s, lo que demuestra un desempeño aceptable considerando la complejidad del sistema, varios usuarios superaron los umbrales de fluidez sugeridos en los estudios previos. Estos datos indican que la variabilidad temporal en la activación sigue siendo una limitación relevante para su aplicación práctica. Además, debido a las características de la muestra, estos resultados no son directamente extrapolables.

3.3. Evaluación de Experiencia de Usuario

Los datos del SAM reportan una experiencia de usuario satisfactoria. La puntuación de valencia es de $6,75 \pm 0,50$, lo que demuestra un sólido consenso entre los participantes, los que percibieron el uso del sistema como una actividad agradable. La activación relativamente baja de $3,25 \pm 0,50$ sugiere que el sistema no introduce estados de estrés ni saturación cognitiva a pesar de la complejidad de la tarea. Por último la percepción del control de los usuarios sobre la tarea queda reflejada en la dominancia de $6,25 \pm 0,96$. Este dato revela que, a pesar de tratarse de un sistema de control compartido entre el robot y el usuario, este se sintió director de los movimientos.

Como conjunto, las métricas obtenidas en el SAM validan que el sistema propuesto, no solo es funcional, sino que proporciona una experiencia natural y segura.

4. Conclusiones

En este estudio preliminar se valida la plataforma multimodal de asistencia bimanual enfocada a tareas de la vida diaria. La integración de una arquitectura basada en una máquina

de estados con distintas interfaces humano-robot demuestra la capacidad del sistema para interactuar con el usuario y con el entorno.

El análisis de comportamiento del BCI muestra que el sistema mantiene un desempeño funcional con ciertas limitaciones que no comprometen a la estabilidad. Por otro lado, el cuestionario SAM demuestra que los participantes reportan una experiencia positiva manteniendo el dominio sobre el sistema robótico.

Como trabajo futuro, se incorporarán interfaces alternativas y se ampliarán las pruebas controladas para validar el sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por Agencia Estatal de Investigación, la Unión Europea-Next Generation EU y Generalitat Valenciana a través de los proyectos CIPRO-M/2022/12 y PLEC2022-009424.

Referencias

- Catalán, J. M., Trigili, E., Nann, M., Blanco-Ivorra, A., Lauretti, C., Cordella, F., Ivorra, E., Armstrong, E., Crea, S., Alcañiz, M., et al., 2023. Hybrid brain/neural interface and autonomous vision-guided whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living (adls). *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation* 20 (1), 61.
- Crea, S., Nann, M., Trigili, E., Cordella, F., Baldoni, A., Badesa, F. J., Catalán, J. M., Zollo, L., Vitiello, N., Aracil, N. G., et al., 2018. Feasibility and safety of shared eeg/eog and vision-guided autonomous whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living. *Scientific reports* 8 (1), 10823.
- Diez, J. A., Blanco, A., Catalan, J. M., Badesa, F. J., Lledo, L. D., Garcia-Aracil, N., 2018. Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor. *Advances in Mechanical Engineering* 10 (2), 1–11.
- Liu, J., Contributors, L., 2024. Llamaindex: Workflows for event-driven llm applications. Componente de orquestación basado en eventos. URL: https://docs.llamaindex.ai/en/stable/module_guides/workflow/
- Nann, M., Cordella, F., Trigili, E., Lauretti, C., Bravi, M., Miccinilli, S., Catalan, J. M., Badesa, F. J., Crea, S., Bressi, F., et al., 2020. Restoring activities of daily living using an eeg/eog-controlled semiautonomous and mobile whole-arm exoskeleton in chronic stroke. *IEEE Systems Journal* 15 (2), 2314–2321.
- Pu, L., Wang, L., Zhang, R., Zhao, T., Jiang, Y., Han, L., 2023. Projected Global Trends in Ischemic Stroke Incidence, Deaths and Disability-Adjusted Life Years From 2020 to 2030. *Stroke* 54 (5), 1330–1339. eprint: <https://www.ahajournals.org/doi/pdf/10.1161/STROKEAHA.122.040073>. URL: <https://www.ahajournals.org/doi/abs/10.1161/STROKEAHA.122.040073> DOI: 10.1161/STROKEAHA.122.040073
- Schalk, G., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N., Wolpaw, J. R., 2004. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on biomedical engineering* 51 (6), 1034–1043.
- Soekadar, S., Witkowski, M., Gómez, C., Opisso, E., Medina, J., Cortese, M., Cempini, M., Carrozza, M. C., Cohen, L., Birbaumer, N., et al., 2016. Hybrid eeg/eog-based brain/neural hand exoskeleton restores fully independent daily living activities after quadriplegia. *Science Robotics* 1 (1), eaag3296.
- Tsao, C. W., Aday, A. W., Almarzooq, Z. I., Anderson, C. A., Arora, P., Avery, C. L., Baker-Smith, C. M., Beaton, A. Z., Boehme, A. K., Buxton, A. E., et al., 2023. Heart disease and stroke statistics—2023 update: a report from the american heart association. *Circulation* 147 (8), e93.
- Wafa, H. A., Wolfe, C. D., Emmett, E., Roth, G. A., Johnson, C. O., Wang, Y., 2020. Burden of stroke in europe: thirty-year projections of incidence, prevalence, deaths, and disability-adjusted life years. *Stroke* 51 (8), 2418–2427.
- World Health Organization, 2001. International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). World Health Organization, Geneva, Switzerland, updated online version accessed in 2025.