



Carrera: Ingeniería Biomédica

Cuarto semestre

Materia: Proyectos IV

Alumnos: Jorge Chávez, María Fernanda Monterrubio, Itzel Cabrera, Tadeo Caballero, Gabriel Rivero, Emiliano Martínez

Asignación: Documento Proyecto

Maestra: Cielo Guadalupe Poot Bote

Fecha de entrega: Lunes 02 de junio del 2025

Sistema de control domótico basado en electrooculografía.

Introducción

En la actualidad, diversas condiciones médicas pueden provocar inmovilidad motriz, como ocurre en el caso del síndrome de enclaustramiento (Locked-in syndrome, LIS), del cual se hace mención en el artículo realizado por Roosemberg, F., et al. (2024), en dicho documento se proporciona un análisis profundo del síndrome, ya que, este padecimiento, al igual que cuadriplejias severas y algunas condiciones neuromusculares, impactan de forma considerable la vida diaria de los que padecen de algunos de estos y se genera una dependencia de terceros para realizar tareas diarias, como el control del entorno doméstico, dado que estas condiciones reducen significativamente la autonomía y calidad de vida.

Situaciones recientes como fue la pandemia, provocaron un agravio mayor hacia las limitaciones del acceso a rehabilitación para personas con alguna discapacidad, dicho tema es abordado en el artículo de Coronel, E., et al. (2022), en el cual se destaca cómo las personas se vieron forzadas a recurrir a tecnologías como telerehabilitación, evidenciando la necesidad de soluciones accesibles y remotas que favorezcan desde un entorno domótico a la independencia del usuario.

Estas enfermedades que limitan la movilidad no solo afectan el entorno del paciente debido a la dependencia física que desarrollan, sino también el tener que afrontar que muchas de las actividades a las que se estaba acostumbrado ya no podrían hacerlas y a aceptar que ya no se llevará la vida que conocía, ambos sucesos pueden generar ansiedad, estrés o un constante estado de negación, tal y como se evidencia en el estudio realizado por Yoshiki, H. et al. (2023), en el cual se analiza el bienestar psicológico de pacientes con LIS, destacando que, a pesar de su parálisis severa, muchos reportan una calidad de vida razonable. Sin embargo, entre el 27% y el 68% de los pacientes experimentan pensamientos de suicidio y eutanasia. Esta situación no solo repercute en el paciente, sino también en sus cuidadores y familiares cercanos. De acuerdo con el estudio de Elisa, A. et al. (2022), da un análisis de cuidar el o evaluar la salud mental tanto de los pacientes como de sus cuidadores debido a que ambos pueden sufrir de ataques de ansiedad o la necesidad constante de apoyo psicológico.

Este tipo de interacciones en donde el paciente se ve desfavorecido por su condición tanto como las limitaciones tecnológicas, evidencia la necesidad de desarrollar sistemas de asistencia que permitan a dichas personas recuperar parte de su autonomía, tales como el de Ramakrishnan, J., et al. (2021), destaca por su integración de un EOG para un sistema de control inteligente para individuos con esclerosis lateral amiotrófica (ELA), pero que presenta limitante como puede ser su interfaz poco intuitiva para usuarios con deterioro cognitivo. Ante esto se ha decidido desarrollar un sistema de control domótico basado en electrooculograma (EOG) con calibración automática para los distintos pacientes.

Antecedentes

El avance de las tecnologías de asistencia ha permitido el desarrollo de sistemas que mejoran la calidad de vida de personas con discapacidades motoras severas. Entre estas tecnologías, la EOG ha emergido como una herramienta efectiva para crear interfaces hombre-máquina no invasivas, facilitando el control de dispositivos mediante movimientos oculares. Esta técnica ha sido aplicada en diversos proyectos recientes, destacando su potencial en entornos de domótica y asistencia personalizada. Algunas de las tecnologías ya existentes que se tomaron en consideración son las siguientes:

1. ElectraSight: Gafas inteligentes con seguimiento ocular no invasivo

En 2024, Schärer et al. presentaron “ElectraSight”, unas gafas inteligentes que integran un sistema de seguimiento ocular completamente a bordo, utilizando una combinación de electrodos de contacto y sin contacto para adquirir señales EOG. Este dispositivo destaca por su bajo consumo energético y su capacidad para clasificar movimientos oculares en tiempo real con una precisión del 92% en seis clases diferentes. Su diseño no requiere calibración específica para cada usuario, lo que facilita su implementación en aplicaciones comerciales y de asistencia personal.

2. Control y monitoreo de dispositivos IoT mediante EOG y comandos de voz

Wazwaz et al. (2021) desarrollaron un sistema que permite a personas con lesiones medulares controlar dispositivos domésticos utilizando señales EOG y comandos de voz. El prototipo emplea tecnología de Internet de las Cosas (IoT) y microcontroladores Arduino para capturar movimientos oculares y señales de voz, logrando una tasa de error

del 2.5% para EOG y 1% para comandos de voz en condiciones óptimas. Este enfoque multimodal ofrece flexibilidad, aunque su dependencia de la voz puede limitar su aplicabilidad en usuarios con pérdida del habla.

3. Diadema inalámbrica con bioelectrónica suave para interfaces hombre-máquina

En 2022, investigadores presentaron una diadema portátil y flexible que utiliza electrodos de oro en patrón fractal para detectar movimientos oculares mediante EOG. Este dispositivo permite la clasificación continua de movimientos oculares en tiempo real, demostrando su aplicabilidad en interfaces hombre-máquina persistentes. Su diseño ergonómico y materiales biocompatibles aseguran comodidad durante el uso prolongado, siendo una opción prometedora para aplicaciones de asistencia diaria.

4. Plataforma de software y hardware abierta para interfaces basadas en EOG

Martínez-Cerveró et al. (2020) desarrollaron una plataforma abierta que combina hardware y software para interfaces hombre-computadora basadas en la clasificación de señales EOG. Utilizando una Raspberry Pi y el dispositivo de adquisición de biosignales OpenBCI, el sistema logra una precisión promedio del 90% en la clasificación de movimientos oculares en cuatro direcciones. Su naturaleza abierta y de bajo costo facilita la replicación y adaptación en diversos entornos, incluyendo aplicaciones de domótica.

5. Sistema híbrido BCI basado en SSVEP y movimientos oculares para control de brazos robóticos

Zhang et al. (2023) propusieron un sistema híbrido de interfaz cerebro-computadora (BCI) que combina potenciales evocadas visuales de estado estable (SSVEP) y movimientos oculares detectados mediante EOG para controlar un brazo robótico. El sistema logra una precisión promedio del 94.75% y una tasa de transferencia de información de 108.63 bits/min, demostrando la eficacia de integrar múltiples señales biológicas para mejorar el control de dispositivos en usuarios con discapacidades motoras.

6. Sistema de adquisición de EOG basado en microcontrolador ATmega AVR

En 2023, se presentó un sistema de adquisición de señales EOG utilizando un microcontrolador ATmega AVR, diseñado para ser compacto y de bajo costo. Este sistema permite la detección de movimientos oculares con alta precisión, siendo adecuado para aplicaciones en domótica y asistencia personal. Su diseño sencillo y

eficiente facilita su integración en dispositivos portátiles y sistemas de control del entorno.

Comparación con el proyecto propuesto

El proyecto que se propone en este contexto se centra en el desarrollo de un sistema domótico controlado exclusivamente mediante señales EOG, dirigido a personas con síndrome de enclaustramiento (LIS). A diferencia de otros sistemas que combinan múltiples modalidades de entrada, este enfoque se especializa en una única vía de control, optimizando la precisión y reduciendo la complejidad para el usuario final.

En comparación con “ElectraSight”, que se enfoca en aplicaciones comerciales y de realidad aumentada, el proyecto propuesto prioriza la accesibilidad y la asistencia en el hogar. Mientras que el sistema de Wazwaz et al. ofrece control multimodal, su dependencia de comandos de voz puede ser una limitación para usuarios con pérdida del habla, una barrera que el proyecto propuesto supera al centrarse únicamente en señales EOG.

La diadema inalámbrica con bioelectrónica suave y la plataforma abierta de Martínez-Cerveró et al. destacan por su innovación en hardware y accesibilidad, respectivamente. Sin embargo, el proyecto propuesto combina estos aspectos al utilizar componentes de bajo costo y un diseño centrado en la comodidad del usuario, todo validado en una maqueta física de una recámara.

El sistema híbrido BCI de Zhang et al. demuestra la eficacia de combinar múltiples señales biológicas para el control de dispositivos complejos como brazos robóticos. No obstante, el proyecto propuesto se enfoca en la simplicidad y la facilidad de uso en entornos domésticos, lo que puede ser más adecuado para usuarios con necesidades específicas de asistencia en el hogar.

Finalmente, el sistema basado en microcontrolador ATmega AVR resalta por su bajo costo y eficiencia, características que también están presentes en el proyecto propuesto, el cual busca ofrecer una solución práctica y replicable para mejorar la autonomía de personas con discapacidades motoras severas.

Objetivos: general y específicos

- Objetivo general:
Desarrollar un sistema de control domótico basado en señales de electrooculografía (EOG), que permita a personas con movilidad motriz reducida o nula interactuar con una interfaz gráfica en pantalla para gestionar dispositivos eléctricos del hogar, mediante movimientos oculares.
- Objetivos específicos:
 - Diseñar e implementar un sistema de adquisición y procesamiento de señales EOG que registre los movimientos oculares del usuario y los traduzca en comandos de control.
 - Desarrollar una interfaz gráfica interactiva, accesible desde una pantalla frente al usuario, que permita seleccionar y controlar distintos dispositivos del entorno domótico mediante entradas provenientes del sistema EOG.
 - Integrar y calibrar la comunicación entre el sistema EOG, el microcontrolador ESP32 y los dispositivos eléctricos, garantizando una respuesta eficiente, precisa y en tiempo real a los comandos del usuario.

Resultados

A) Esquemático de la PCB

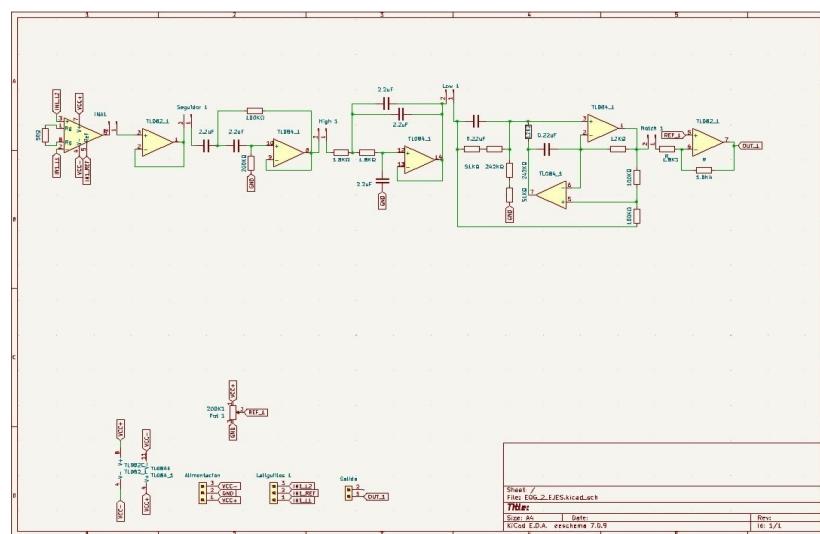


Imagen 1. Diseño esquemático del circuito del EOG actualizado.

B) Diagrama de la PCB

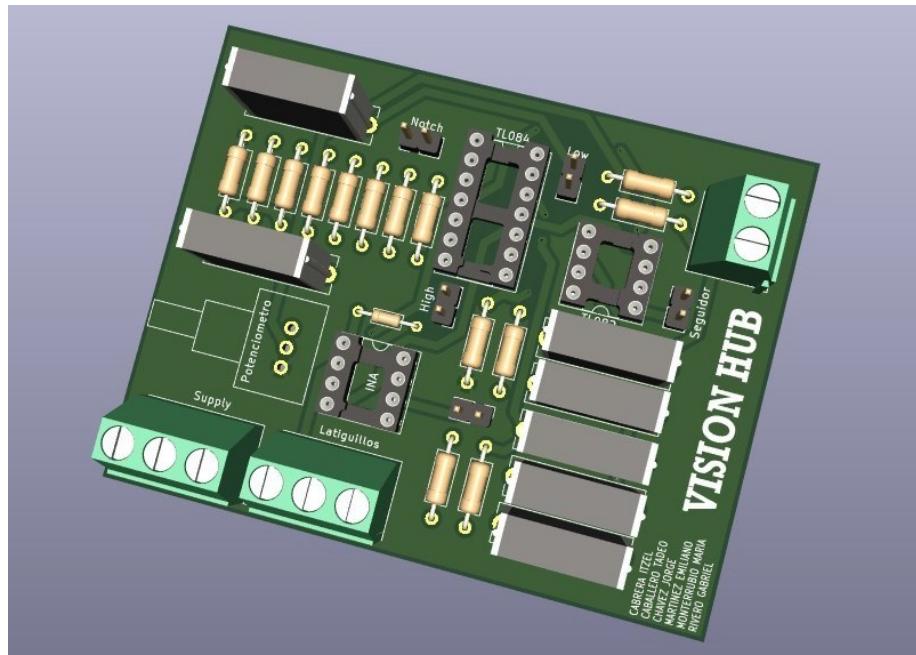
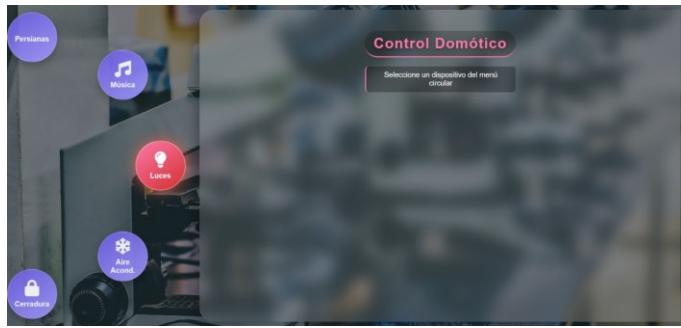


Imagen 2. Diseño 3D de la placa PCB para el EOG actualizado.

C) Interfaz



Imágenes 3 y 4. Visualización de la interfaz

Se optó por una interfaz simple e intuitiva, controlada mediante movimientos limitados como mirar hacia arriba o abajo, con el objetivo de reducir el esfuerzo físico del usuario durante su uso. Esta decisión se basó en la necesidad de facilitar la navegación y evitar la fatiga por acciones repetitivas.

En lugar de utilizar una estructura tradicional basada en íconos cuadrados y cuadrículas, el diseño se inspiró en una antigua aplicación de música que organizaba las opciones como discos de vinilo giratorios. Esta referencia permitió simplificar la navegación entre dispositivos y sus respectivas opciones mediante un esquema de control con pocos movimientos, ideal para separar los menús en grupos y subgrupos de forma eficiente.

D) Comunicación Bluetooth



Imagen 5 y 6. Comunicación Bluetooth.

Se utilizó comunicación Bluetooth entre dos módulos ESP32 para transmitir y procesar señales de EOG. Uno de los módulos se configuró como emisor, encargado de establecer un servidor Bluetooth con identificadores únicos (UUIDs) que permitieran su reconocimiento por parte del receptor. El emisor permanecía a la espera de conexión, y una vez establecida, transmitía los datos de EOG al servidor y notificaba al receptor sobre la disponibilidad de nuevos datos.

Se utilizó un segundo ESP32 como receptor, el cual tenía previamente definido el UUID del servidor a buscar. Este dispositivo permanecía en estado de escaneo hasta lograr la conexión con el emisor. Una vez conectado, el receptor recibía los datos cuando el

servidor indicaba su disponibilidad. Los datos recolectados se utilizaron para representar gráficamente la señal EOG y para establecer umbrales que permitieran identificar patrones específicos de movimiento ocular, asociados a comandos del sistema. Finalmente, se utilizó un script en Python que recibía la información del tipo de movimiento identificado. Este programa simulaba la pulsación de teclas (como las flechas de dirección) en el teclado. Dado que la interfaz gráfica desarrollada respondía a estas teclas mediante código JavaScript, se logró así el control del sistema por medio de movimientos oculares.

E) PCB



Imagen 3. Vista superior de la PCB.

Discusión

Tras analizar los resultados de este proyecto, se puede resaltar que el prototipo cumple con los parámetros técnicos, funcionales y visuales establecidos a través de los objetivos planteados inicialmente. Se llevó un seguimiento riguroso del plan de trabajo, lo que favoreció el cumplimiento en tiempo y forma de cada una de las actividades establecidas en el cronograma. La metodología de distribución de tareas y el trabajo simultáneo en distintos bloques del proyecto, además de la implementación y validación de cada los mismos, de manera individual permitieron obtener resultados favorables a la hora de unificar todas las partes.

El sistema de adquisición, filtrado y procesamiento de la señal EOG despliega datos dentro del rango esperado en comparación con los obtenidos en la bibliografía revisada. No obstante, para obtener esta respuesta, se tuvieron que hacer modificaciones, tanto al diseño de la PCB, como al diseño del circuito. El circuito original contaba con un INA para amplificar la señal, un seguidor de voltaje, un filtro pasa bajas de 28 Hz y un pasa altas

de 0.5 Hz, los cuales lograron atenuar más del 50% de las ondas, respectivamente y un filtro notch de 60 Hz para eliminar el ruido de corriente eléctrica, el cuál reportó una efectividad del 47% en cuanto a la atenuación de la onda. A este diseño se agregó un filtro de primer orden de 0.5Hz y un seguidor de voltaje adicionales a los previstos. Esto favoreció la exactitud de la señal final y extendió el proceso de filtrado.

En cuanto a la interfaz gráfica desarrollada en HTML, C + +, JavaScript y Python, se logró un diseño intuitivo que permite identificar de forma rápida las opciones con las que el usuario puede interactuar. Al tener una geometría circular, en lugar del modelo de matriz primeramente planteado, nos permitió eliminar un segundo eje de EOG, el eje Y, conservando únicamente un EOG en el eje X que mide los movimientos de derecha a izquierda, lo que redujo el espacio del circuito y minimizó el tiempo de programación.

Respecto a la maqueta para la demostración funcional del prototipo, el diseño será lo más semejante a la vivienda de los usuarios para poder representar la activación e interrupción de los dispositivos eléctricos en esta. Para la elección de materiales y detalles a escala que aporten realismo a la maqueta, se consultará a especialistas en diseño y arquitectura.

Dentro de las primeras pruebas a futuro, está contemplado, en primer lugar, comprobar la efectividad de la respuesta de los comandos de la interfaz al ser activados con la señal obtenida, verificando la funcionalidad de la conexión Bluetooth. De igual forma, se continúa trabajando en el diseño de la nueva PCB con los nuevos filtros integrados.

La conexión Bluetooth mediante el ESP32 ofrece la posibilidad de un prototipo más cómodo y sin necesidad de cables a la vista. Mientras que los comandos preestablecidos permiten al usuario con poca movilidad controlar dispositivos eléctricos dentro de su entorno más próximo, como lo es su habitación o algún otro espacio de su hogar en el que se encuentren, brindándoles un sentido de autonomía y de menor dependencia.

Referencias

Ramakrishnan, J., Sivasakthivel, R., Akila, T. et al. Electrooculogram-aided intelligent sensing and high-performance communication control system for massive ALS individuals. *J Supercomput* 77, 6961–6978 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03517-2>

Coronel, E., Candoni, G., Pelaez, S., Sanchez-Correa, C., Tomadín, R., & Valdez, M. (2023). Percepciones sobre la rehabilitación durante la pandemia por COVID-19 de las personas con discapacidad motora. *Rehabilitación* (Madrid. Internet), 57(3), 100737. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2022.03.002>

Aust, E., Linse, K., Graupner, S.-T., Joos, M., Liebscher, D., Grosskreutz, J., Prudlo, J., Meyer, T., Günther, R., Pannasch, S., & Hermann, A. (2022). Quality of life and mental health in the locked-in-state-differences between patients with amyotrophic lateral sclerosis and their next of kin. *Journal of Neurology*, 269(11), 5910–5925. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11238-0>

Yoshiki, H., Morimoto, N., & Urayama, K. Y. (2023). Understanding the psychological well-being of patients with locked-in syndrome: A scoping review. *Cureus*, 15(1), e34295. <https://doi.org/10.7759/cureus.34295>

Rooseenberg, F., Baquerizo, P., Martinez, E., & Abril, P. (2024). SÍNDROME DE ENCLAUSTRAMIENTO: PRESENTACIÓN DE CASO CLÍNICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA. *INVESTIGATIO*, (22). <https://doi.org/10.31095/investigatio.2024.22.4>

Schärer, N., Villani, F., Melatur, A., Peter, S., Polonelli, T., & Magno, M. (2024). ElectraSight: Smart Glasses with Fully Onboard Non-Invasive Eye Tracking Using Hybrid Contact and Contactless EOG. *arXiv preprint arXiv:2412.14848*.

Wazwaz, A., Ziada, M., Awawdeh, L., & Tahboub, M. (2021). Control and Monitor of IoT Devices using EOG and Voice Commands. *International Journal of Applied Methods in Electronics and Computers*, 4(1). <https://doi.org/10.18100/ijamec.799507>

Kim, J., Lee, S., & Lee, H. (2022). Soft Wireless Headband Bioelectronics and Electrooculography for Persistent Human–Machine Interfaces. *ACS Applied Electronic Materials*, 4(2), 1234–1242. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01436>

Martínez-Cerveró, J., Khalili Ardali, M., Jaramillo-González, A., Wu, S., Tonin, A.,

Birbaumer, N., & Chaudhary, U. (2020). Open Software/Hardware Platform for Human-Computer Interface Based on Electrooculography (EOG) Signal Classification. Sensors, 20(9), 2443. <https://doi.org/10.3390/s20092443>

Zhang, J., Gao, S., Zhou, K., Cheng, Y., & Mao, S. (2023). An online hybrid BCI combining SSVEP and EOG-based eye movements. Frontiers in Human Neuroscience, 17, 1103935. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1103935>

Banerjee, A., Pal, M., Datta, S., & Tibarewala, D. N. (2023). EOG acquisition system based on ATmega AVR microcontroller. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 14(1), 123–134. <https://doi.org/10.1007/s12652-023-04622-9>