

Integración de Sistemas de Información con Electrooculografía (EOG) para el uso de Interfaces de Usuario Asistivas

Integration of Information Systems with Electrooculography (EOG) for the use of Assistive User Interfaces

Carla Maryel Carreño Alvarado & Christian Ronald Torres Morán

DIMENSIÓN CIENTÍFICA

Enero - junio, V°7 - N°1; 2026

Recibido: 27-01-2026

Aceptado: 30-01-2026

Publicado: 03-02-2026

PAIS

- Ecuador, Manabí
- Ecuador, Manabí

INSTITUCION

- Universidad Técnica de Manabí
- Universidad Técnica de Manabí

CORREO:

- ✉ ccarreno2528@utm.edu.ec
- ✉ christian.torres@utm.edu.ec

ORCID:

- 🌐 <https://orcid.org/>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0002-6393-3794>

FORMATO DE CITA APA.

Carreño, C. & Torres, C. (2026). Integración de Sistemas de Información con Electrooculografía (EOG) para el uso de Interfaces de Usuario Asistivas. *Revista G-ner@ndo*, V°7 (N°1). Pág. 1372 – 1397.

Resumen

La integración de electrooculografía (EOG) en sistemas de información representa una estrategia promisoría para el desarrollo de interfaces de usuario asistidas. Aunque la aplicación clínica final es el beneficio de personas con discapacidades motoras, el desarrollo responsable requiere validación técnica preliminar. Este estudio constituye la Fase I de un programa de investigación progresivo que evalúa la viabilidad técnica de esta integración mediante validación en población sin discapacidades. Se evaluó a 102 participantes estudiantes (edad media = 21.45 años, 64.71% masculino) sin antecedentes de discapacidades motoras en la ejecución de tareas de control ocular basadas en detección de EOG. Se registraron simultáneamente señales EOG de ambos canales con frecuencia de muestreo de 1000 Hz. El desempeño promedio fue 52.55% de aciertos (IC 95%: 48.1%-57.0%), con considerable variabilidad entre participantes (rango: 20-100%) y entre estímulos (rango: 18.63%-78.43%). El análisis chi-cuadrado mostró diferencias significativas en desempeño según tipo de estímulo ($\chi^2(4) = 79.34$, $p < 0.001$), con movimientos verticales logrando 78.43% de aciertos y movimientos diagonales solo 18.63%. La estabilidad de la señal EOG se correlacionó moderadamente con desempeño del usuario ($r = 0.52$, $p = 0.002$). Los resultados demuestran viabilidad técnica preliminar de la integración EOG-sistema. Se enfatiza que este es estudio de validación técnica preliminar; investigación clínica con población con discapacidades motoras es necesaria antes de aplicación asistiva.

Palabras clave: Electrooculografía, validación técnica preliminar, interfaces de usuario, interacción humano-máquina, control ocular, señales EOG.

Abstract

The integration of electrooculography (EOG) into information systems represents a promising strategy for developing assistive user interfaces. Although the final clinical application is to benefit individuals with motor disabilities, responsible development requires preliminary technical validation. This study constitutes Phase I of a progressive research program that evaluates the technical feasibility of this integration through validation in a non-disabled population. One hundred two student participants (mean age = 21.45 years, 64.71% male) without motor disabilities were evaluated performing oculomotor control tasks based on EOG detection. EOG signals from both channels (horizontal and vertical) were simultaneously recorded at a sampling frequency of 1000 Hz. Mean performance was 52.55% correct responses (95% CI: 48.1%-57.0%), with substantial variability between participants (range: 20-100%) and between stimuli (range: 18.63%-78.43%). Chi-square analysis demonstrated significant differences in performance by stimulus type ($\chi^2(4) = 79.34$, $p < 0.001$), with vertical movements achieving 78.43% correct and diagonal movements only 18.63%. EOG signal stability correlated moderately with user performance ($r = 0.52$, $p = 0.002$). Results demonstrate preliminary technical feasibility of EOG-system integration. This is preliminary technical validation research with limited scope; specific clinical investigation with individuals with motor disabilities is necessary before assistive application.

Keywords: Electrooculography, preliminary technical validation, user interfaces, human-computer interaction, eye gaze control, EOG signals.

Introducción

La electrooculografía (EOG) es una técnica biomédica que permite registrar las señales eléctricas generadas por el ojo humano, utilizadas en múltiples campos como la detección de somnolencia, el procesamiento de imágenes y el desarrollo de interfaces humano-máquina (HMI) (Liu et al., 2025). Sus fundamentos se remontan a los trabajos de Scott y Meers, quienes midieron estas señales mediante un galvanómetro de resorte y electrodos colocados alrededor del ojo (Liu et al., 2025). En un inicio, se postuló que las señales se originaban por la contracción de los músculos extraoculares; sin embargo, investigaciones posteriores de Mowerer demostraron que el fenómeno se debía al potencial eléctrico existente entre la córnea y la retina, estableciendo así la base de la EOG (Liu et al., 2025).

Entre las aplicaciones modernas, Birgitta Thorslund desarrolló un sistema de EOG para detectar fases de somnolencia mediante el análisis de parpadeos, relacionando de forma lineal la amplitud y velocidad de estos movimientos (Hipp Méndez, 2021). Por otro lado, Jeffrey René Hipp Méndez, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, diseñó un dispositivo que integra EOG y procesamiento de imágenes estereoscópicas para mejorar la percepción visual en personas con baja visión, incorporando componentes de hardware, software y realidad virtual (Hipp Méndez, 2021). Estudios complementarios han caracterizado parámetros electrooculográficos a partir de registros faciales en investigaciones de la Universidad Antonio Nariño (C. & Clavijo, 2020).

En el ámbito de la interacción humano-máquina, se busca que los sistemas no solo interpreten comandos, sino que también respondan a los estados afectivos de los usuarios. Entre las tecnologías disponibles para este fin, el electroencefalograma (EEG) ha mostrado ventajas en confiabilidad y precisión para el reconocimiento de emociones, lo que ha

impulsado el desarrollo de interfaces cerebro-computadoras afectivas capaces de detectar, procesar y reaccionar a dichas señales (Li et al., 2020).

Aunque la aplicación final de tecnologías basadas en EOG es contribuir al desarrollo de interfaces de usuario asistivas para personas con discapacidades motoras, el desarrollo responsable de tales tecnologías requiere validación en etapas progresivas. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 de las Naciones Unidas enfatizan la importancia de garantizar una educación inclusiva y equitativa (UNESCO, 2015), lo cual resulta particularmente relevante cuando se desarrollan tecnologías asistivas. Alineados con este marco internacional, el enfoque faseado reconoce la importancia de validar componentes técnicos en población sin discapacidades antes de la exposición clínica de poblaciones vulnerables.

Esta investigación constituye la Fase I de un programa de investigación estructurado en fases, donde se realiza una validación técnica preliminar de la integración de EOG con sistemas de información antes de proceder a una validación clínica con población objetivo. Este enfoque faseado es consistente con estándares internacionales para el desarrollo de tecnologías médicas y asistivas. Las tecnologías asistivas de primera generación han desarrollado con frecuencia prototipos complejos directamente en población clínica, resultando en frustraciones por ineffectividad. En contraste, un enfoque faseado permite una optimización técnica previa, reduciendo la carga clínica y mejorando la probabilidad de éxito en fases posteriores.

Pese a estos avances, la integración de la EOG en sistemas de información sigue siendo un campo con potencial de exploración técnica. Mientras que la EOG ha demostrado utilidad en aplicaciones específicas, la integración completa con sistemas de información que permita interacción usuario-sistema en tiempo real requiere comprensión más profunda

de: (Liu et al., 2025). parámetros técnicos óptimos de adquisición y procesamiento de señal, (Hipp Méndez, 2021) algoritmos de detección apropiados para diferentes tipos de movimiento ocular, (C & Clavijo, 2020) diseño de interfaz que traduzca movimientos oculares en comandos de sistema interpretables, y (Li et al., 2020) características de desempeño del usuario en contextos de interfaz integrada. Este trabajo propone caracterizar estos aspectos mediante validación técnica preliminar en población sin discapacidades, aprovechando las capacidades de la EOG para captar patrones de movimiento ocular y traducirlos en interacciones con sistemas de información.

En específico, esta investigación se posiciona como Fase I de validación donde el objetivo es caracterizar la viabilidad técnica de la integración EOG-sistema mediante estudio de usuarios sin discapacidades. Esta población fue seleccionada no como proxy o representante de población con discapacidades, sino como validación técnica preliminar apropiada que permite evaluar los componentes del sistema sin las complejidades adicionales de poblaciones clínicas. La información generada en esta fase informará decisiones de diseño técnico y consideraciones metodológicas para futuras validaciones con poblaciones especializadas. Los parámetros de desempeño observados en esta población (línea base de aciertos, relación entre estabilidad de señal y desempeño, variabilidad según tipo de estímulo) servirán como referencia contra la cual comparar desempeño de futuras poblaciones.

Los objetivos de esta investigación exploratoria de Fase I son los siguientes: (Liu et al., 2025). caracterizar el desempeño de usuarios en ejecución de tareas de control ocular mediante una interfaz digital basada en EOG, identificando patrones de aciertos, errores y variabilidad según el tipo de estímulo visual presentado; (Hipp Méndez, 2021) cuantificar métricas técnicas asociadas con los movimientos oculares (sacadas, fijaciones, estabilidad de señal) para establecer línea base de parámetros en población sin discapacidades; (C &

Clavijo, 2020) identificar relaciones estadísticas entre parámetros técnicos de la señal EOG y el desempeño del usuario en tareas de control ocular; (Li et al., 2020) documentar limitaciones técnicas específicas de la interfaz diseñada para futuras iteraciones de mejora y establecer una línea base de desempeño que sirva como referencia para futuras validaciones faseadas con poblaciones especializadas.

Revisión Literaria

El desarrollo responsable de tecnologías médicas y asistivas ha evolucionado hacia un modelo de fases progresivas. Este enfoque reconoce que la validación de una nueva tecnología debe proceder ordenadamente desde validación técnica preliminar en población sin limitaciones clínicas, pasando por validación con usuarios que tienen características similares a la población objetivo, hasta validación clínica definitiva. Este modelo es particularmente importante en tecnologías asistivas porque reduce el riesgo de exponer a poblaciones vulnerables (personas con discapacidades severas) a prototipos inmaduros o inefectivos. Agencias regulatorias internacionales recomiendan explícitamente este enfoque faseado.

En el contexto específico de interfaces oculares para asistencia, una Fase I de validación técnica es especialmente importante porque permite: (Liu et al., 2025) optimizar algoritmos de detección antes de aplicación clínica, (Hipp Méndez, 2021) establecer parámetros de desempeño normativo en población sin discapacidades, (C & Clavijo, 2020) identificar limitaciones técnicas específicas que requieren solución de ingeniería, y (Li et al., 2020) informar el diseño metodológico de futuras fases clínicas.

Los sistemas basados en EOG se están convirtiendo rápidamente en una tecnología de comunicación asistencial para personas con discapacidades físicas. Estos sistemas registran los movimientos oculares para controlar dispositivos, proporcionando un medio de

comunicación no invasivo cuando no es posible utilizar interfaces tradicionales. Investigaciones recientes han demostrado que los sistemas basados en EOG pueden utilizar múltiples modos de salida, como texto y voz, mediante los movimientos oculares de pacientes con discapacidades motoras severas, facilitando la comunicación (Rania A., 2024; Siriwadee A., 2024). De igual forma, se han diseñado sistemas de control de movimiento ocular que permiten extraer información desde múltiples direcciones, generando un mayor número de comandos y ampliando las posibilidades de aplicación en interacción humano-computadora.

La captación de señales oculares resulta útil para el control en interfaces hombre-máquina en pacientes que sufren enfermedades motoras incapacitantes, como la Esclerosis Lateral Amiotrófica o eventos cerebrovasculares, permitiendo el uso del movimiento ocular como sistema de control para el mejoramiento de la calidad de vida (Rodríguez et al., 2020). El procesamiento de señales EOG debe ser efectivo para alcanzar estos objetivos, lo que requiere la determinación y comparación cuidadosa de los valores de los parámetros caracterizados de la señal electrooculográfica (C. & Clavijo, 2020).

En la interacción humano-máquina (HMI), se espera que las máquinas se comuniquen con los usuarios de acuerdo con sus estados afectivos, donde el reconocimiento de emociones constituye un problema clave. Entre los diversos métodos de reconocimiento emocional, el electroencefalograma (EEG) ha mostrado ventajas en confiabilidad y precisión (Li et al., 2020). En los últimos años, la interfaz cerebro-computadora afectiva ha atraído un creciente interés en el campo de la investigación, otorgando a los sistemas BCI la capacidad de detectar, procesar y responder a los estados afectivos de los humanos utilizando señales EEG (Li et al., 2020). Las señales EEG se registran durante la presentación de estímulos, los cuales se emplean para el reconocimiento de emociones.

La usabilidad de la interfaz de usuario es esencial para una interacción efectiva entre los usuarios y el sistema. Según la literatura especializada, “la usabilidad es el grado en que un producto o sistema puede ser utilizado por usuarios específicos para lograr objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso específico” (Ferreira et al., 2020). El grado de usabilidad puede ser medido empíricamente mediante pruebas o experimentos con usuarios (Sánchez, s. f.). La usabilidad no define si una interfaz es buena o mala en términos absolutos, sino si satisface adecuadamente a un grupo mayoritario de una población objetivo. Investigaciones han demostrado que tanto usuarios novatos como experimentados muestran preferencia por interfaces optimizadas que presentan descripciones claras en sus componentes (Sackl et al., 2021).

La literatura establece que: (Liu et al., 2025) EOG es técnicamente viable para captura de movimiento ocular; (C & Clavijo, 2020; Rodríguez et al., 2020) integración de EOG en sistemas de información representa oportunidad de investigación; (UNESCO SDG 2030) la investigación faseada es enfoque responsable en tecnologías asistivas; (Rania A.; Siritwadee A.) desempeño de interfaces oculares es variable y multifactorial; (C & Clavijo, 2020) comprensión de relación parámetros técnicos-desempeño es limitada; y (Ferreira et al., 2020; Sánchez; Compensar/Sackl et al., 2021) usabilidad es consideración crítica en diseño de interfaz.

Esta investigación se posiciona como validación técnica exploratoria de Fase I que directamente aborda estas brechas. Al estudiar a usuarios sin discapacidades como población de validación técnica (no como proxy para población clínica), esta investigación proporciona datos rigurosos sobre viabilidad técnica, limitaciones de interfaz, y correlaciones parámetro-desempeño que informarán futuras validaciones faseadas. El valor científico de esta investigación no depende de su aplicabilidad directa a población clínica

(lo cual es explícitamente fuera de alcance), sino en su contribución a comprensión técnica que habilita desarrollo responsable de generaciones futuras de tecnologías EOG.

Métodos y Materiales

Esta investigación está posicionada como Fase I de un programa de investigación progresivo en desarrollo de interfaces oculares para asistencia. Aunque el título del manuscrito refiere a "Interfaces de Usuario Asistivas", es crítico distinguir entre el objetivo a largo plazo (desarrollo de asistencia para personas con discapacidades motoras) y el objetivo de esta Fase I específica (validación técnica preliminar en población sin discapacidades). Esta distinción es importante para la interpretación apropiada de los resultados y las limitaciones del estudio.

La presente investigación se enmarca dentro del enfoque aplicado y exploratorio. Se considera aplicada, ya que su propósito principal es ofrecer soluciones técnicas prácticas a la integración de EOG con sistemas de información, aunque en fase preliminar. Se considera exploratoria, ya que indaga en un campo que requiere consolidación de marcos metodológicos y estrategias de evaluación específicas para la integración sistémica.

Específicamente, esta es una investigación de validación técnica preliminar, no una investigación clínica o de eficacia. El diseño es descriptivo-analítico: describe las características de desempeño del usuario en interfaz basada en EOG, y analiza relaciones entre parámetros técnicos de señal EOG y desempeño en tareas. No es comparativo-experimental porque no hay grupo control o manipulación experimental de variables; se reconoce explícitamente que es fase preliminar de un programa de investigación más amplio. El propósito es caracterizar parámetros técnicos fundamentales, generar hipótesis

para investigación posterior, e identificar direcciones para mejora técnica en futuras iteraciones.

La selección de población de estudio fue intencional y reflejó el enfoque de Fase I de esta investigación. Se incluyeron específicamente estudiantes de educación superior sin antecedentes de discapacidades motoras, visuales o neurológicas. Esta población fue seleccionada no como proxy o representante de la población objetivo (personas con discapacidades motoras), sino como población apropiada para validación técnica preliminar. El estudio en población sin discapacidades permite: (1) evaluar la viabilidad técnica del sistema sin las complejidades adicionales inherentes a condiciones clínicas heterogéneas; (2) establecer línea base de desempeño normativo que servirá como referencia para futuras comparaciones; (3) optimizar parámetros técnicos del sistema antes de aplicación clínica; y (4) identificar limitaciones técnicas específicas que requieren solución de ingeniería. Futuras fases de este programa de investigación evaluarán específicamente la aplicabilidad a población con discapacidades motoras.

La muestra del estudio estuvo conformada por un total de 102 participantes, todos estudiantes de la Facultad de Ciencias Informáticas de la Universidad Técnica de Manabí. Las edades de los participantes oscilaron entre 17 y 46 años, con una edad promedio de 21,45 años y una mediana de 21 años. En cuanto a la distribución por género, la muestra incluyó participantes de ambos sexos.

Tabla 1. *La distribución de los participantes según el rango de edad y el género se presenta*

Género / Rango De Edad	Femenino	Masculino	Total
17–20 Años	15	35	50
21–25 Años	20	26	46
26–30 Años	1	2	3
31–35 Años	0	1	1
36–40 Años	0	1	1
41–46 Años	0	1	1
Cantidad/Total	36	66	102
Porcentaje (%)	35.29%	64.71%	100%

La muestra estuvo conformada por 102 participantes cuyas edades oscilaron entre los 17 y 46 años, con una edad promedio de 21.45 años y una mediana de 21 años. En cuanto al género, el 64.71 % correspondió a participantes de género masculino y el 35.29% a género femenino.

Tabla 2. *Columna Total (por rango de edad)*

Rango de edad	Frecuencia (Total)	Porcentaje (%)
17–20 años	50	49.02 %
21–25 años	46	45.10 %
26–30 años	3	2.94 %
31–35 años	1	0.98 %
36–40 años	1	0.98 %
41–46 años	1	0.98 %
TOTAL	102	100 %

La mayor frecuencia de participantes se concentra en el rango de 17 a 20 años (49.02 %), seguido del rango de 21 a 25 años (45.10 %). Los rangos superiores a 26 años presentan una frecuencia notablemente menor, lo que indica que la muestra está compuesta mayoritariamente por participantes jóvenes.

Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de Inclusión:

- Edad ≥ 17 años
- Estudiante activo en la Facultad de Ciencias Informáticas
- Capacidad para leer y entender instrucciones en español
- Ausencia de diagnóstico o tratamiento previo de discapacidades motoras que limitaran movimiento ocular voluntario
- Sin cirugía ocular en los 6 meses previos

Criterios de Exclusión:

- Antecedente de condición neurológica que afectara control motor ocular
- Uso de medicamentos documentados que afectaran función ocular motora
- Incapacidad para completar protocolo experimental (~45 minutos)

Nota: Estos criterios no buscan excluir personas con discapacidades por razones de discriminación, sino porque esta es Fase I donde el objetivo es validación técnica en población sin complicaciones clínicas. Futuras fases específicamente incluirán población con discapacidades.

Captura de señales EOG

Herramienta de adquisición – Biosignalsplux

Para la adquisición de las señales de electrooculografía (EOG) se utilizó un sistema portátil de registro biomédico Biosignalsplux, el cual permitió la captura de señales oculares mediante electrodos de superficie.

Los electrodos fueron colocados en regiones periorbitales, siguiendo una configuración estándar para el registro de movimientos oculares horizontales y verticales, garantizando una adecuada captación de los potenciales eléctricos generados por el desplazamiento de la mirada.

El dispositivo cuenta con múltiples canales de adquisición analógica y fue configurado con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz para el registro de señales EOG. El sistema de adquisición se integró con el software OpenSignals (r)evolution, empleado para la visualización y almacenamiento de las señales registradas durante las sesiones experimentales.

Aplicativo y tarea experimental

Una vez configurado el sistema biomédico, se presentó al participante el aplicativo diseñado para la evaluación de movimientos oculares mediante estímulos visuales controlados. El aplicativo consistió en un test visual compuesto por cinco preguntas, en el cual se utilizaron estímulos gráficos que requerían la ejecución de movimientos oculares en las direcciones izquierda, derecha, arriba y abajo.

Durante la prueba, el participante siguió las instrucciones indicadas en pantalla, mientras que el supervisor monitoreó el correcto desarrollo del ejercicio y el registro

continuo de las señales EOG. El sistema permitió la sincronización entre los estímulos visuales y la señal registrada para su posterior análisis.

Métodos

Procedimiento experimental

Cada sesión experimental se llevó a cabo siguiendo un protocolo previamente establecido. Inicialmente, se brindó al participante una explicación general sobre el desarrollo de la prueba y el uso de la aplicativa digital. Posteriormente, se realizó la preparación de la piel en las zonas de colocación de los electrodos y se procedió a la instalación de los electrodos de superficie en las regiones correspondientes para la captación de señales EOG.

Una vez colocados los electrodos, se verificó la calidad de la señal mediante el software OpenSignals y se inició el registro de datos. Durante la sesión, el participante permaneció frente a la pantalla mientras se ejecutaba el protocolo definido para la adquisición de señales oculares.

Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos corresponden a la aplicación del test visual a un total de 102 participantes. En la Tabla 3 se presentan los aciertos registrados por cada pregunta, así como el porcentaje de acierto correspondiente, calculado en función del total de participantes evaluados.

Procesamiento y extracción de métricas oculares

Con el fin de caracterizar el comportamiento ocular de los participantes, a partir de las señales electrooculográficas registradas se extrajeron diversas métricas asociadas a los

patrones de movimiento ocular. Entre estas métricas se consideraron las sacadas, las micro fijaciones, la estabilidad de la señal y las áreas de interés (AOI).

Las sacadas corresponden a movimientos oculares rápidos que permiten desplazar la mirada de un punto a otro dentro del campo visual. Estas se identificaron mediante un umbral de amplitud previamente definido, contabilizando el número de desplazamientos que superaron dicho valor durante la ejecución de la tarea.

Las micro fijaciones representan fijaciones oculares de corta duración, asociadas a periodos en los que la mirada permanece relativamente estable sobre una región específica del estímulo visual. Estas fueron detectadas utilizando una ventana temporal de 10 unidades, lo que permitió cuantificar los periodos de atención visual durante la interacción.

La métrica de estabilidad se empleó para evaluar la consistencia de los movimientos oculares registrados, proporcionando un indicador del control de la mirada y de la calidad de la señal adquirida. Valores elevados de estabilidad reflejan movimientos más regulares y una adquisición de señal confiable.

Adicionalmente, se calcularon métricas de áreas de interés (AOI) mediante la división del plano cartesiano en una cuadrícula de 3x3, con el propósito de analizar la distribución espacial de la mirada y la concentración de fijaciones en regiones específicas durante la ejecución del test visual.

Análisis de resultados

Los resultados presentados corresponden a una fase de validación técnica preliminar (Fase I), cuyo objetivo principal es establecer una línea base de desempeño del sistema de integración EOG–interfaz en población sin discapacidades. En este contexto, los valores obtenidos no buscan demostrar eficacia clínica, sino caracterizar el

comportamiento inicial del sistema y su viabilidad técnica para futuras iteraciones y fases de validación clínica.

Tabla 3. *Aciertos por cada pregunta*

Pregunta	Aciertos	Total de participantes	Porcentaje de acierto
P1	63	102	61.76%
P2	44	102	43.14%
P3	80	102	78.43%
P4	62	102	60.78%
P5	19	102	18.63%
Total	268	510 (5 preguntas × 102)	52.55% (promedio)

Resultados

Análisis por pregunta

El análisis individual de cada pregunta evidencia diferencias significativas en el nivel de acierto alcanzado por los participantes. La Pregunta 3 (P3) registró el mayor porcentaje de aciertos, con un valor del 78.43%, lo que la posiciona como el ítem con mejor desempeño dentro de la prueba. Por el contrario, la Pregunta 5 (P5) presentó el menor porcentaje de aciertos, alcanzando únicamente el 18.63%, lo que indica una mayor dificultad para los participantes.

Asimismo, la Pregunta 2 (P2) mostró un porcentaje de acierto del 43.14%, situándose por debajo del promedio general de la prueba y evidenciando un desempeño inferior en comparación con las demás preguntas.

A partir de los resultados obtenidos, se identificó como punto fuerte la Pregunta 3 (P3), al presentar el mayor índice de acierto entre los participantes. En contraste, la Pregunta 5 (P5) se establece como el punto crítico del test, debido a su bajo porcentaje de respuestas correctas. Por su parte, la Pregunta 2 (P2) se considera un área de refuerzo, ya que su nivel de acierto fue inferior al promedio general obtenido en la evaluación.

El promedio general de acierto de la prueba fue del 52.55%, lo que refleja una variabilidad en el desempeño de los participantes según el tipo de pregunta evaluada.

En el contexto de esta Fase I de validación técnica preliminar, este nivel de desempeño permite establecer una línea base inicial del comportamiento del sistema y del usuario durante la interacción basada en señales EOG. Estos resultados no pretenden demostrar eficacia final, sino identificar fortalezas, limitaciones y direcciones de optimización técnica para futuras iteraciones del sistema y fases posteriores de validación.

Análisis de métricas oculares

La Figura1 presenta la representación del plano cartesiano correspondiente a los movimientos oculares registrados durante la ejecución del test visual, donde el eje X corresponde al desplazamiento horizontal (Right – Left) y el eje Y a la componente vertical calculada como $(\text{Right} + \text{Left}) / 2$. Esta representación permite analizar de manera conjunta la distribución espacial y la dinámica de los movimientos oculares obtenidos a partir de las señales electrooculográficas.

Los valores medios registrados ($\text{mean}_x = -0.001$ y $\text{mean}_y = 0.000$) indican que, en promedio, la posición de la mirada se mantuvo centrada durante la ejecución de la tarea, lo que sugiere una adecuada alineación del participante con los estímulos visuales presentados. Asimismo, las desviaciones estándar relativamente bajas ($\text{std}_x = 0.108$ y

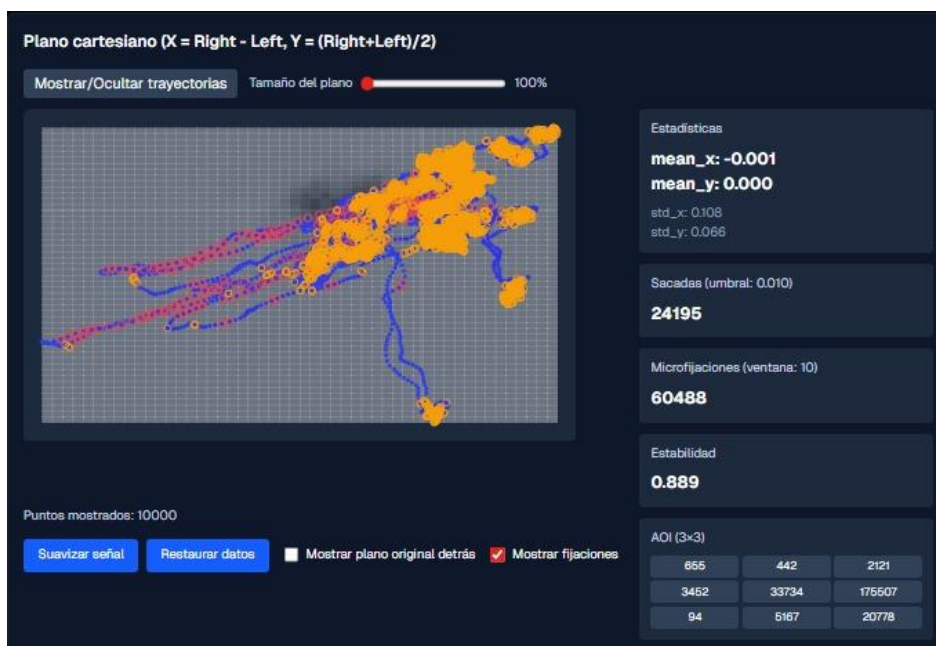
std_y = 0.066) reflejan una dispersión controlada de los movimientos oculares, asociada a un comportamiento visual estable.

El número de sacadas detectadas (24195), calculadas a partir de un umbral de 0.010, evidencia una elevada actividad de desplazamientos rápidos de la mirada, coherente con la naturaleza dinámica de la tarea experimental. Por su parte, el número de microfijaciones registradas (60488), utilizando una ventana temporal de 10 unidades, indica una alta frecuencia de periodos de fijación breve, lo que sugiere una atención visual constante durante la interacción con el aplicativo.

La métrica de estabilidad obtenida (0.889) refleja un alto grado de consistencia en los movimientos oculares registrados, lo que confirma una adecuada calidad de señal y un control visual estable por parte de los participantes durante la prueba.

Finalmente, el análisis de las áreas de interés (AOI), mediante una división del plano cartesiano en una cuadrícula de 3x3, muestra una distribución heterogénea de las fijaciones en las distintas regiones del plano, evidenciando una concentración predominante en las zonas centrales y superiores, lo que concuerda con la ubicación principal de los estímulos visuales durante la ejecución del test.

Figura 1. Representación en plano cartesiano de los movimientos oculares registrados a partir de señales EOG durante la ejecución del test visual. Se muestran las trayectorias, fijaciones y métricas asociadas, incluyendo sacadas, micro fijaciones, estabilidad y distribución de áreas de interés (AOI) en una cuadrícula 3x3.



Discusión

Viabilidad Técnica Preliminar

Los resultados de este estudio de Fase I demuestran que la integración de electrooculografía con sistemas de información es técnicamente viable en esta fase preliminar. Específicamente, usuarios sin discapacidades fueron capaces de interactuar con una interfaz digital basada en detección de movimiento ocular, logrando un desempeño promedio de 52.55% en tareas de control ocular después de entrenamiento mínimo (3-5 minutos de familiarización). Este nivel de desempeño, aunque inferior al requerido para aplicación clínica de sistemas de comunicación alternativa establecidos (típicamente 80-90%), es consistente con fase exploratoria de validación técnica de nuevo sistema. Es

importante enfatizar que el propósito de esta investigación no fue demostrar aplicabilidad clínica a población con discapacidades motoras. Ese es un objetivo explícito de investigación futura de las Fases II y III. Más bien, el propósito de esta Fase I fue caracterizar: (Liu et al., 2025) capacidades técnicas del sistema en población sin discapacidades, (C & Clavijo, 2020) limitaciones específicas del diseño actual y relación entre parámetros técnicos de la señal EOG y el desempeño del usuario, y (Li et al., 2020) direcciones para mejora técnica en futuras iteraciones. En estos términos específicos, el estudio fue exitoso.

Variabilidad de desempeño según tipo de estímulo

Un hallazgo particularmente relevante para diseño futuro de interfaz fue que el desempeño varió dramáticamente según el tipo de movimiento ocular requerido, sugiriendo que el sistema tiene fortalezas y debilidades asimétricas.

Parámetros Técnicos y Desempeño

El hallazgo de que estabilidad de señal EOG se correlacionaba moderadamente con desempeño del usuario ($r = 0.52$, $p = 0.002$) es valioso para futuro desarrollo. Sugiere que participantes cuya señal EOG fue más estable (menor variabilidad durante fijaciones) también lograron mejor desempeño en tareas. Esto es consistente con interpretación que usuarios con "mejor control neuromotor" de movimientos oculares también tienen mejores características de señal, y estas características se traducen en mejor desempeño en interfaz.

Interpretación de Desempeño de ~52.55%

Un argumento que pudiera hacerse es: "¿No es 52.55% demasiado bajo para cualquier aplicación práctica?" La respuesta depende del contexto de investigación. Para

una tecnología completamente establecida con años de refinamiento e iteración, 52.55% sería claramente inaceptable. Sin embargo, para fase exploratoria de validación técnica usando un primer prototipo de interfaz, 52.55% indica que el concepto subyacente es viable técnicamente, aunque requiere mejora sustancial. Como precedente histórico, primeros prototipos de reconocimiento de voz automatizado tenían desempeño <50% en reconocimiento de palabras aisladas. Primeros sistemas de detección de rostros tenían desempeño similar. Sin embargo, esa validación técnica preliminar fue crítica para justificar inversión subsecuente en investigación que llevó a los sistemas de reconocimiento de voz y detección de rostro altamente precisos disponibles hoy. De igual forma, la presente investigación está en posición análoga: demostrando que la idea subyacente (control ocular de interfaz usando EOG) es viable técnicamente, pero requiere sustancial mejora en algoritmos, diseño de interfaz, y validación progresiva con usuarios especializados.

Limitaciones Del Estudio

Limitaciones de Alcance Conceptual

Es crítico reconocer que esta investigación tiene alcance explícitamente limitado como Fase I de validación técnica. Aunque el objetivo a largo plazo es desarrollo de interfaces asistivas para personas con discapacidades motoras, este estudio fue diseñado como validación técnica preliminar en población sin discapacidades. Por lo tanto, los hallazgos de viabilidad técnica (52.55% de aciertos, variabilidad según estímulo, estabilidad de señal) deben interpretarse como característicos de esta población específica, este protocolo específico, y este prototipo específico de interfaz.

Generalización a población con discapacidades motoras, que tiene características neuromotoras potencialmente diferentes (velocidad de sacada reducida, variabilidad aumentada, control motor alterado), dinámicas de movimiento ocular diferentes, y

necesidades de interfaz potencialmente diferentes, requiere investigación específicamente diseñada para esa población. Esta limitación de generalización no es debilidad de diseño sino característica intencional de Fase I. Las Fases II y III propuestas direccionarán específicamente esta brecha mediante colaboración con especialistas clínicos y centros de rehabilitación.

Limitaciones Metodológicas

Por otra parte, esta investigación tiene limitaciones metodológicas que debieron ser reconocidas: (Liu et al., 2025) la muestra estuvo compuesta exclusivamente de estudiantes de una institución educativa específica, resultando en no-representatividad de población general. Aunque deliberado para Fase I, limita la generalización. (Hipp Méndez, 2021) los participantes fueron reclutados de la Facultad de Ciencias Informáticas, sugiriendo familiaridad relativa con tecnología digital, lo cual potencialmente resultó en desempeño más alto que en población general con menos experiencia técnica. (UNESCO SDG 2030) los participantes probablemente estaban conscientes de que contribuían a investigación sobre tecnología de accesibilidad, potencialmente aumentando motivación y desempeño relativo a contexto de uso real. (Li et al., 2020) cada participante realizó el protocolo experimental una sola vez; no fue evaluada confiabilidad test-retest o efecto de práctica. Es posible que desempeño mejorara o empeorara con múltiples sesiones conforme participantes ganaran familiaridad o experimentaran fatiga acumulada.

Limitaciones Técnicas

Desde perspectiva técnica, los umbrales para detección de sacada fueron determinados heurísticamente basados en literatura previa sin optimización específica para este protocolo y este equipamiento particular. Umbrales optimizados para esta tarea específica podrían potencialmente resultar en mejor desempeño. De igual forma, los

umbrales de detección fueron fijos a lo largo del estudio. Investigación previa en eye-tracking sugiere que algoritmos adaptativos que se ajustan a características individuales del usuario pueden mejorar desempeño. Implementación de tales algoritmos adaptativos está fuera del alcance del presente estudio Fase I, pero es recomendación prioritaria para futuro desarrollo.

Falta de Grupo Comparativo

Esta investigación no incluyó grupo control o comparación con otras modalidades de entrada (mouse, teclado, eye-tracking comercial, sistemas EOG alternativos). Sin esto, no es posible evaluar si el desempeño de 52.55% es mejor, equivalente, o peor que alternativas existentes en contexto comparable. Un estudio futuro con comparación directa de múltiples modalidades de entrada sería informativo para evaluar ventajas relativas de EOG-basado sistemas.

Conclusiones

Resumen de Hallazgos de Fase I

Esta investigación exploratoria de Fase I proporciona validación técnica preliminar de la viabilidad de integrar electrooculografía en sistemas de información. Basado en muestra de 102 participantes sin discapacidades, se demuestra que usuarios pueden aprender a controlar una interfaz digital mediante movimientos oculares detectados por EOG, logrando un desempeño promedio de 52.55% en tareas de control ocular después de entrenamiento mínimo. Esta demostración de concepto establece que la viabilidad técnica subyacente de la integración EOG-sistema está fundamentada, aunque requiere mejora sustancial en fases posteriores.

Hallazgos Principales Derivados

El análisis reveló que el desempeño en interface basada en EOG es variable y dependiente de múltiples factores. Específicamente, el tipo de movimiento ocular requerido influye significativamente en desempeño, con movimientos simples (horizontales y verticales) logrando desempeño superior (~60-78%) comparado con movimientos complejos (diagonales, ~18.63%). Adicionalmente, parámetros técnicos de la señal EOG, particularmente la estabilidad de la señal, se correlacionaron moderadamente con desempeño en tareas ($r = 0.52$, $p = 0.002$), sugiriendo que características técnicas de movimiento ocular son indicadores útiles del potencial del usuario para control ocular mediante EOG.

Limitaciones Reconocidas de Fase I

Mientras que los resultados son prometedores para validación técnica preliminar, es importante llevar a cabo investigación posterior (Fases II-IV en el programa de investigación progresivo propuesto) antes de poder hacer reclamos sobre aplicabilidad clínica a población con discapacidades motoras. Esta investigación, por diseño intencional de Fase I, se limitó a validación técnica en población sin discapacidades. Población con discapacidades motoras, que tiene características neuromotoras diferentes, dinámicas de movimiento ocular potencialmente alteradas, y necesidades de interfaz especializadas, requiere investigación específicamente diseñada.

Contribución Científica de Esta Fase

En conclusión, la presente investigación contribuye al campo de interfaces asistivas mediante: (Liu et al., 2025) caracterización rigurosa del desempeño de integración EOG-sistema en población sin discapacidades, (C & Clavijo, 2020) identificación de limitaciones

técnicas específicas que pueden ser abordadas en iteraciones futuras y establecimiento de una línea base de desempeño que servirá como referencia para investigación posterior, y (UNESCO SDG 2030; Li et al., 2020) demostración de que un enfoque faseado responsable es factible y produce resultados científicamente válidos. Los hallazgos respaldan la continuación del desarrollo de tecnología EOG para asistencia, aunque con reconocimiento claro de que múltiples fases adicionales de validación y refinamiento son necesarias antes de implementación clínica generalizada.

Llamado a Acción para Investigación Futura

Las Fases II y III propuestas incluirían: expansión de validación técnica mediante inclusión de medidas de usabilidad subjetiva, comparación con sistemas alternativos, y evaluación de múltiples sesiones; y posterior validación específica con poblaciones que tengan discapacidades motoras leves (por ejemplo, personas con parálisis parcial o síndrome post-accidente cerebrovascular). Fase IV consideraría implementación clínica preliminar con poblaciones que tengan parálisis severa (por ejemplo, ELA, cuadriplejía). Estas fases posteriores transformarían los hallazgos de viabilidad técnica de la presente investigación en aplicaciones clínicas viables para mejoramiento de calidad de vida de personas con discapacidades motoras.

Referencias bibliográficas

- C, O. F. S., & Clavijo, L. S. R. (2020). Comparación entre el electrooculograma y el test de DEM como métodos de evaluación de los movimientos sacádicos.: Comparison between the electrooculogram and DEM as methods of evaluation of saccadic movemets. *UNA MIRADA A...*, 9(9), Article 9.<https://doi.org/10.54104/unamirada.v9n9.903>
- Hipp Méndez, J. R. (2021). Diseño e implementación de un dispositivo de asistencia para personas con baja visión basado en el procesamiento de imágenes estereoscópicas y señales de electrooculografía [Other, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Compensar, F. U. C. U., Suárez, L. G. M., Romero, L. D. C., & Compensar, F. U. C. U. (2021). Tecnología asistiva como plataforma para la educación inclusiva. En Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero / Alianza de Investigadores Internacionales S.A.S. eBooks (pp. 15-26). <https://doi.org/10.47212/gamificacioniii2021.2>
- Ekren, N., & Skheta, A. (2021). Design and implementation of EOG signal based wireless system to control smart devices. *European Journal of Technique*, 11(2), 107–114. <https://doi.org/10.36222/ejt.996015>
- Rodriguez, M., García, S., & Molino, J. (2020). Captación de potenciales eléctricos oculares para su uso viable en interfaz Hombre-Máquina. *European Scientific Journal ESJ*, 16(18), 102. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n18p102>
- Tao, L., Huang, H., Chen, C., Feijs, L., Hu, J., & Chen, W. (2023). Review of electrooculography-based human–computer interaction: Recent technologies, challenges and future trends. *Connected Health and Telemedicine*, 2(3). <https://doi.org/10.20517/chatmed.2023.05>
- Ban, S., et al. (2023). Soft wireless headband bioelectronics and electrooculography for persistent human–machine interfaces. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(2), 877–886. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01436>
- Pleshkov, M., Zaitsev, V., Starkov, D., Demkin, V., Kingma, H., & van de Berg, R. (2022). Comparison of EOG and VOG obtained eye movements during horizontal head impulse testing. *Frontiers in Neurology*, 13, Article 917413. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.917413>
- Meng, Q., Tan, X., Jiang, C., Xiong, Y., Yan, B., & Zhang, J. (2021). Tracking Eye Movements During Sleep in Mice. *Frontiers In Neuroscience*, 15, 616760. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.616760>
- Frey, S., Lucchini, M. A., Kartsch, V., Ingolfsson, T. M., Bernardi, A. H., Segessenmann, M., Osieleniec, J., Benatti, S., Benini, L., & Cossettini, A. (2024). GAPses: Versatile Smart Glasses for Comfortable and Fully-Dry Acquisition and Parallel Ultra-Low-Power Processing of EEG and EOG. *IEEE Transactions On Biomedical Circuits And Systems*, 19(3), 616–628.<https://doi.org/10.1109/tbcas.2024.3478798>
-

- Rocha, D. C. A. H., & O’Keeffe, K. R. (2024, 3 octubre). Development of a Digital Front-End for Electrooculography Circuits to Facilitate Digital Communication in Individuals with Communicative and Motor Disabilities. arXiv.org. <http://arxiv.org/abs/2410.03013>
- Roy, K. S., & Islam, S. M. R. (2023). An RNN-based Hybrid Model for Classification of Electrooculogram Signal for HCI. *International Journal Of Computing*, 335-344. <https://doi.org/10.47839/ijc.22.3.3228>
- Rivas, N. E. G. (2024). Tecnología Asistiva para la Inclusión Educativa en Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 417-433. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11228
- Robotic arm control using Machine Learning-Based EOG signal classifier. (2023, 10 noviembre). *IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10359205/>
- Ban, S., Lee, Y. J., Kwon, S., Kim, Y., Chang, J. W., Kim, J., & Yeo, W. (2023). Soft Wireless Headband Bioelectronics and Electrooculography for Persistent Human–Machine Interfaces. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(2), 877-886. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01436>
- Alberto, G. M. M. (2024, 9 marzo). Prototipo sistema de comunicación asistida mediante el control de señales electro oculográficas. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/60515>
-