

# Development of an Electrooculography Method for Eye Movement Analysis: Insights into Eye Signal Processing Techniques

Celine Coello<sup>1</sup>, Nicole Gradiz<sup>1</sup>, María Martínez<sup>1</sup>, Diana Rubio<sup>1</sup>, César González<sup>1</sup>, Mariana Rodríguez<sup>1</sup>

**Faculty Mentor:** Fernanda Cáceres Lagos, M. Sc.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, celinecoello@unitec.edu, nicole.gradiz@unitec.edu, mariamartinez5@unitec.edu, diana.rubio@unitec.edu, cesargonza11@unitec.edu, mariale2309@unitec.edu

**Abstract**—This study presents a comprehensive approach to electrooculography (EOG) signal processing, encompassing both theoretical foundations and practical implementation. The research explores existing technologies for detecting filtered eye movements, focusing on videoculography and electroencephalography (EEG) methods. Building upon these foundations, the study details the development of a novel EOG acquisition system using Arduino and the AD8232 signal conditioning block. Methodological considerations, including signal acquisition, hardware design, and software implementation, are discussed in detail. Signal processing techniques, such as filtering and thresholding, are employed to enhance signal clarity and enable real-time event detection. The study underscores the importance of integrating theoretical insights with practical implementation in advancing EOG signal processing techniques for ocular movement analysis.

**Index Terms**—Arduino, biomedical signal processing, electrooculogram, electrooculography, eye movement, MatLab.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde seguir una línea de texto al leer un libro hasta enfocar la mirada en un objeto en movimiento, los movimientos oculares son una manifestación de la compleja interacción entre el sistema visual humano y el mundo que lo rodea. A lo largo de la historia, la comprensión de estos movimientos ha impulsado avances en la investigación científica, la tecnología y la atención médica, y una de las herramientas clave para analizarlos es la electroculografía (EOG).

Según [1] la electroculografía (EOG) es una técnica que registra la actividad eléctrica generada por los ojos humanos. En particular, la córnea tiene una carga positiva mayor que la retina, lo que permite que el ojo se comporte como un dipolo eléctrico cuyos ejes están alineados con los ejes ópticos y, por lo tanto, giran con los ojos. Estos dos polos crean un campo eléctrico a partir del cual la señal eléctrica puede registrarse mediante electrodos colocados cerca de los ojos. Además, [1] menciona que al capturar y analizar estas señales eléctricas, se puede obtener información valiosa sobre la dirección y la velocidad de los movimientos oculares de una persona.

La electroculografía es el registro de la actividad ocular, y se utiliza como una herramienta diagnóstica para diversas patologías que afectan el sistema oculomotor, que incluyen trastornos del sueño, enfermedades neurodegenerativas y pruebas relacionadas con el equilibrio. Además, puede desempeñar

un papel confiable como fuente de comandos, ya que, es posible establecer una correlación directa entre la dirección de la mirada y una acción específica a realizar. En este sentido, [2] señala que se han desarrollado numerosos sistemas que permiten el control basado en la dirección de la mirada. A partir de esta idea, se han creado sistemas que favorecen la autonomía personal, abarcando el control de brazos robóticos, dispositivos protésicos y sillas de ruedas eléctricas.

En este contexto, se presenta un proyecto orientado a desarrollar un dispositivo capaz de detectar la señal filtrada de los movimientos oculares, aprovechando las ventajas y aplicaciones de la electroculografía. A lo largo de este trabajo, se explorarán los fundamentos de la EOG, sus aplicaciones y cómo este proyecto contribuirá a avanzar en esta emocionante área de investigación.

### A. Introducción a la investigación

El EOG ha desempeñado un papel crucial al proporcionar una comprensión más profunda de las señales oculares, tanto normales como anormales.

En este proyecto, al registrar y procesar estas señales de manera precisa, se establece una conexión directa entre las intenciones del usuario, expresadas a través de los movimientos oculares.

A continuación, se presenta la electroculografía en el contexto de su aplicación en la medición de los movimientos oculares generados por el ojo. Asimismo, se abordará la naturaleza de las señales bioeléctricas generadas por los movimientos oculares, destacando la singularidad de estas señales. Seguidamente, se analizará la función de los electrodos, ubicados estratégicamente cerca de los ojos, en la captura precisa de las señales eléctricas.

Finalmente, se realizará una revisión del estado del arte, acerca de los prototipos o dispositivos actuales que configuran el panorama de la movilidad asistida mediante el EOG.

### B. Antecedentes del problema

1) *Movimientos oculares:* En [3] se menciona que el avance y desarrollo de la electrónica ha permitido la creación de dispositivos para registrar y analizar el movimiento de los globos oculares, lo que ha proporcionado una comprensión

más profunda de los patrones oculares normales y anormales. Los métodos analógicos de registro tenían limitaciones en cuanto a la obtención de información detallada sobre estas respuestas fisiológicas, ya que se basaban principalmente en la inspección visual de los trazados. En la actualidad, gracias a la introducción de computadoras y su aplicación en investigaciones biomédicas, se ha logrado desvelar información previamente oculta. Esto ha revelado que el análisis visual inicial de los patrones de movimiento es solo el primer paso, y que hay mucho más que se puede descubrir.

#### 2) *Técnicas de registro de los movimientos oculares:*

Como se ve en [4], en el ámbito médico, las técnicas más avanzadas se basan en enfoques electrofisiológicos, con énfasis en la EOG (electroculografía), que se fundamenta en las propiedades bioeléctricas del ojo. En el globo ocular, existe una diferencia de potencial de aproximadamente 1 mV, donde la córnea es positiva en el polo anterior y el epitelio pigmentario de la retina es negativo en el polo posterior. Esta diferencia de potencial permite tratar el ojo como un dipolo y representa un vector en su eje anteroposterior. Electrodo ubicados alrededor de la órbita registran el campo eléctrico generado por este dipolo. La magnitud y polaridad del potencial capturado en un momento determinado dependen del ángulo entre el dipolo y los electrodos, lo que facilita correlacionar las variaciones del potencial con los movimientos oculares, con una buena precisión temporal.

Una variante de la EOG es la electronistagmografía, utilizada para investigar nistagmos y movimientos oculares relacionados mediante la combinación del registro oculográfico con estímulos vestibulares, como sillones giratorios u otros dispositivos.

3) *Métodos de estudio de los movimientos oculares:* Todos los métodos de estudio de los movimientos oculares, ya sea con EOG u otros sistemas, involucran el análisis de la relación entre diferentes parámetros de los movimientos oculares y otras variables, como la latencia entre la aparición de un estímulo y el inicio de un movimiento sacádico o antisacádico. Por lo tanto, [4] también menciona que el oculograma siempre se integra con algún tipo de estimulación o registro. Enfoques más recientes incluyen protocolos de estimulación magnética transcraneal y la obtención de imágenes de las áreas cerebrales relacionadas con las funciones visuales y oculomotoras mediante resonancia magnética funcional.

Según el libro [4], además de ofrecer una alta precisión temporal, como lo hace la EOG, otras técnicas proporcionan una mayor definición espacial y permiten determinar la trayectoria de los movimientos oculares y cefálicos. Un ejemplo es la técnica de bobina escleral en campo magnético, que se basa en la interacción de un campo magnético con una bobina ubicada en la esclerótica a través de una lente de contacto y que genera señales eléctricas que traducen las posiciones del ojo y la cabeza.

4) *El electroculograma (EOG):* Según el libro [5], es una técnica de exploración que resulta sencilla y poco molesta para los pacientes, que se utiliza en combinación con el electroretinograma (ERG) para evaluar la funcionalidad de

la retina. Su contribución más destacada se observa en el diagnóstico de condiciones como el disco viteliforme de la mácula, especialmente en sus etapas tempranas, donde su detección con oftalmoscopia puede ser complicada. Incluso en casos con apariencia normal en el fondo de ojo, el EOG puede dar resultados positivos, ayudando a establecer diagnósticos, como el de pseudodisco viteliforme de la mácula.

Además, [5] menciona que junto con el ERG, el EOG es útil para diagnosticar condiciones como la retinopatía pigmentaria, donde la pigmentación está ausente. También proporciona información valiosa sobre la función retiniana en situaciones de buena visión, como en un paciente con embolia de la arteria central de la retina, o para evaluar la evolución de una enfermedad con el tratamiento.

Según [5] el EOG también es útil en casos donde el principal síntoma es la hemeralopía (dificultad para ver en condiciones de poca luz) y no se detectan otras anomalías en las exploraciones convencionales. En otros casos, permite evaluar la mejoría después de tratamientos quirúrgicos. Además, ofrece una comprensión objetiva del funcionamiento de la retina y su evolución en diversas situaciones clínicas. Este procedimiento, que registra el potencial de reposo de la retina, se diferencia del electroretinograma, que registra la respuesta a un estímulo luminoso. Ambos métodos, EOG y ERG, se complementan para proporcionar una visión más completa de la actividad eléctrica retiniana y son valiosos en la práctica clínica.

5) *Proceso visual:* El proceso visual es esencial para la percepción y comprensión del entorno, y se basa en un funcionamiento altamente preciso de los órganos visuales. Para que este proceso se realice de la manera más efectiva, es fundamental que el medio que se observa no se desplace rápidamente frente a la retina. El motivo de esto radica en la necesidad de identificar con detalle los objetos presentes en el campo visual.

La retina, una parte crítica del ojo, desempeña un papel crucial en este proceso al detectar la forma, el color y el movimiento de los objetos, así como evaluar la distancia y posición de estos en el entorno. No obstante, la retina recopila información a una velocidad relativamente lenta. Por consiguiente, como se ve en la investigación [6] es imperativo que se establezca la imagen sobre una misma área receptora en la retina. Si esto no ocurre, la nitidez de la imagen se deteriora.

Además, [6] señala de manera general, que los ojos se encuentran ubicados en la cabeza y el cuerpo, lo que implica una cantidad significativa de movimientos. Esto plantea un desafío en la tarea de mantener una visión estable, especialmente cuando la cabeza se mueve o los objetos se desplazan alrededor.

#### 6) *Reflejos oculares:*

- 1) Reflejo Vestíbulo ocular (RVO): Este reflejo tiene la función de fijar el ojo en su posición cuando la cabeza está en movimiento. Esto asegura que el campo visual se mantenga estable, lo que es crucial para evitar la pérdida de nitidez en la visión.
- 2) Reflejo Optocinético (ROC): El ROC es responsable de fijar el campo visual en la retina, permitiendo que los

objetos en movimiento sean seguidos adecuadamente.

En el proceso de visión, la fovea desempeña un papel crucial, ya que es la parte de la retina más sensible visualmente. Para obtener una visión óptima de un objeto específico, es necesario centrar su imagen en la fovea. Para lograrlo, el sistema visual humano cuenta con una serie de movimientos oculares que permiten ajustar el ángulo de la mirada. Estos movimientos se conocen como "sacadas" y se suceden por breves períodos en los que el ojo permanece inmóvil, denominados "fijaciones".

La investigación [6] menciona que en los seres humanos y otros animales con visión frontal, es crucial que ambos ojos enfoquen de manera conjugada. Esto significa que deben ajustar la amplitud y velocidad de sus movimientos de manera precisa para mantener una visión estereoscópica. La visión estereoscópica permite percibir la profundidad y distancia de los objetos en el entorno.

7) *Tipos de movimientos oculares*: Los movimientos oculares son diversos y complejos, y su velocidad determina su clasificación en tres categorías principales: movimientos lentos, rápidos y movimientos mixtos. Estos movimientos se originan en cuatro sistemas de control oculomotor:

- 1) Sistema de Seguimiento y Nistágmico: Este sistema se activa cuando los objetos se desplazan en el campo visual a lo largo de los ejes horizontal y vertical. Sin embargo, este sistema opera de manera óptima dentro de ciertos límites de velocidad de desplazamiento.
- 2) Movimientos Sacádicos: Estos movimientos entran en acción cuando los objetos se desplazan rápidamente y requieren una corrección inmediata en la dirección de la mirada.
- 3) Sistema Vergente: Este sistema está diseñado para ajustar los desplazamientos a lo largo del eje anteroposterior.
- 4) Movimientos en las Tres Dimensiones: Los cuatro sistemas de control oculomotor se combinan para abordar desplazamientos que ocurren en todas las dimensiones del espacio.

8) *Control neurológico de los movimientos oculares*: Éste implica una serie de procesos intrincados para permitir el movimiento del ojo. Para lograr este cometido, es necesario superar varios desafíos:

- 1) Superar la Resistencia y Viscosidad de los Tejidos Oculares: Para mover el ojo, se deben contraer los músculos extrínsecos que rodean el globo ocular. Estos músculos deben vencer la resistencia y la viscosidad de los tejidos blandos en la órbita ocular.
- 2) Superar las Fuerzas Elásticas: Cuando el ojo cambia de posición, hay fuerzas elásticas que intentan devolverlo a su posición neutral. Nuevamente, este proceso requiere la contracción de la musculatura extrínseca del ojo.

En este contexto, según [6] se debe considerar la existencia de una inervación de tipo "pulso-tono". El "pulso" puede interpretarse como un comando para cambiar la velocidad del movimiento, mientras que el "tono" se asemeja a un comando para ajustar la posición del ojo. Todos los movimientos ocu-

lares deben interpretar y coordinar ambas variables de manera sincronizada para funcionar eficazmente.

Esta función de control se logra mediante un integrador neural que realiza un cálculo matemático del comando de posición, integrando el comando de velocidad con respecto al tiempo. Cuando este integrador funciona de manera adecuada, el ojo es llevado a su nueva posición gracias al impulso que controla la velocidad. Sin embargo, si el sistema falla y no hay una inervación que comande la posición, el ojo regresa a su posición inicial. En un intento de corregir nuevamente la posición, se inicia una secuencia repetitiva que puede persistir indefinidamente, generando un fenómeno conocido como "nistagmo evocado por la mirada" según la investigación [6].

9) *El globo ocular desde una perspectiva eléctrica*: Asimismo, [6] menciona que el globo ocular exhibe un comportamiento análogo al de un dipolo. Este fenómeno se caracteriza por la presencia de una carga negativa en la región de la retina, que se relaciona con los potenciales de acción generados por las neuronas especializadas, mientras que en la córnea se observa una carga positiva correspondiente al potencial de reposo corneal.

De acuerdo a [7], cuando se producen movimientos del ojo en los planos horizontal y vertical, estos inducen un desplazamiento paralelo en el dipolo eléctrico del ojo. Este desplazamiento es detectable a través de la utilización de un electrodo posicionado alrededor del ojo.

10) *Necesidad de electrooculógrafos*: Uno de los principales problemas que se pueden solucionar con un dispositivo de detección de movimiento oculares se encuentra en la Revista Chilena de Neuropsicología, con el artículo [8] que se basa en buscar soluciones a las personas que padecen de trastornos severos de la movilidad. Uno de los pacientes que fue de ayuda para poder llevar a cabo este estudio fue un paciente de 57 años, profesor universitario de teatro y actor que debido a un Evento Cerebro Vascular (ECV), sufre hoy en día de Síndrome de Enclaustramiento (SdE).

Como se ve en el artículo [8], consecuencia de su condición en Centro de Desarrollo de Tecnologías de Inclusión de la Escuela de Psicología de la Pontificia Universidad Católica de Chile (CEDETi UC, propuso al paciente llevar a cabo un trabajo de apoyo con el objetivo de incorporar un dispositivo de comunicación aumentativa que promoviese su inclusión social y laboral. Para poder llevar a cabo esta tarea se incluyó en el proceso de rehabilitación la creación de un sistema de Comunicación Aumentativa Alternativa (CAA) autónomo, el diseño de una interfaz (un entorno interactivo con una computadora y el uso de un eye tracker como soporte. El sistema consta de una computadora controlada por la mirada que permite al paciente comunicarse mediante un procesador de texto y controlar el entorno mediante un transmisor/receptor de infrarrojos. Dado que el paciente solo podía realizar movimientos oculares verticales, se creó una interfaz que permite el uso completo de los movimientos verticales. El diseño de la interfaz se basa en el análisis de las funciones cognitivas del usuario con el fin de optimizar el uso de sus

aplicaciones. El sistema CAA está diseñado centrándose en el uso e incorpora activamente al paciente en la propuesta de forma activa, de acuerdo con recomendaciones internacionales.

### C. Estado del Arte

En este apartado se hace una revisión de investigaciones de tecnologías existentes capaces de detectar la señal filtrada de los movimientos oculares. Según la información obtenida, los métodos empleados en los últimos 7 años, están relacionados a técnicas de detección basados en videoculografía infrarroja, y en electroencefalografía (EEG).

Como se ve en el artículo [9], una de las principales tecnologías que existen para la detección de movimientos oculares es el eye tracking. El eye tracking es una técnica bien establecida y ampliamente utilizada para investigar la cognición humana. El seguimiento del eye tracking implica una agrupación de fuentes de luz infrarrojo o de luz infrarroja cercana y cámaras que rastrean el comportamiento de la mirada de uno (monocular) o ambos (binoculares).

Según [9], en la mayoría de los sistemas modernos, una serie de fuentes de luz no invisible iluminan el ojo y producen un reflejo corneal; el rastreador ocular monitorea la relación entre este reflejo y en centro de la pupila para calcular vectores que relacionan la posición del ojo con ubicaciones en el mundo percibido. A medida que los ojos se mueven, el punto de mirada calculado en el espacio también se mueve. Los rastreadores oculares están disponibles en varias configuraciones de hardware, incluidos sistemas con apoyo para la barbilla para estabilizar la cabeza y sistemas remotos que pueden adaptarse a un grado limitado de movimientos de la cabeza y sistemas más nuevos basados en gafas móviles.

Otra de las tecnologías nuevas que han surgido gracias al estudio de los movimientos oculares, es la detección de pestaños. El estudio [10] describe como puede ayudar la detección de pestaños para ayudar a la comunicación. El estudio se enfocó en tecnologías basadas en el uso del pestaño. En otras palabras, se basó en las señales eléctricas resultantes del movimiento ocular ligado a un pestaño. La investigación se centró en detectar cuando el usuario está o no pestañeando. Al realizar un pestaño voluntario, cierta actividad eléctrica ocurre en la zona periférica de los ojos, dicha actividad puede ser interpretada con electrodos y se pueden buscar patrones que después puedan utilizarse para decidir cuándo se detecta pestaño y cuando no. Esto se hace con la finalidad de interpretar las señales eléctricas en los pestaños para luego poder utilizarlos como un medio de comunicación y transformarlo en un sistema AAC (Augmentative and Alternate Communication).

En las investigaciones [11], [12] se empleó el sistema VOG para la arquitectura del sistema, que constaba de un estimulador visual, una videocámara y un sistema de control para sincronizar en tiempo el estímulo y la imagen ocular. La iluminación utilizada en este método es la infrarroja monocromática y el software de estimulación emplea diferentes patrones de estímulo visual para adquirir y visualizar los movimientos

oculares del paciente cuando este sigue el estímulo visual o no.

En pocas palabras, la videoculografía se compone por una mentonera con una cámara web, una computadora personal con dos monitores: uno para estimulación visual del sujeto y otro que muestra la interfaz gráfica del software para el registro y análisis video ocular. En el libro [13] también se describe como este dispositivo hace uso de la tecnología de la videoculografía.

Finalmente, se encontraron varios estudios que emplearon la técnica del EEG. Los autores de las investigaciones [14], [15] utilizaron algoritmos para el reconocimiento de movimiento ocular en cuatro direcciones: mirada arriba, abajo, izquierda y derecha. Las señales de movimiento ocular provenían de señales electroencefalograficas (EEG) y fueron registradas por diferentes dispositivos. Posteriormente, se generaron imágenes en escala de grises que representaban la información de los movimientos oculares. Después, se extrajeron características estadísticas de las imágenes para desarrollar un clasificador modular que emplea tres perceptrones simples.

### D. Objetivo general

Desarrollar un dispositivo de electroculografía que sea capaz de capturar, analizar y procesar las señales eléctricas generadas por los movimientos oculares.

## II. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión literaria de las diferentes variantes de electrooculografía y sus aplicaciones en campos médicos, de entretenimiento e investigación. Se identificó el problema que se estaba abordando y los objetivos específicos del proyecto definiendo los requisitos del sistema y las características esperadas del producto final. Se utilizó la metodología experimental para la elección del método para la adquisición de datos. Este método permitirá discernir los segmentos relevantes de la señal eléctrica generada por los movimientos oculares. Seguidamente, se llevaron a cabo estudios de viabilidad de cada alternativa, considerando aspectos como los componentes y el costo de éstos, el tiempo requerido para desarrollar la opción y el tiempo de procesamiento de datos.

Una vez seleccionado el método se diseñó la estructura del sistema, la cual consiste en la conexión del hardware y la estructura del software donde se especificaron las interfaces y las interacciones entre los componentes. Una vez esto construido, se comprobó que el sistema contase con buena comunicación al igual que, un buen funcionamiento de los componentes. Se realizaron pruebas unitarias para verificar el funcionamiento correcto de cada componente individualmente y pruebas de integración para asegurarse de que todos los componentes funcionaran correctamente en conjunto. Según estas pruebas, se realizaron ajustes según los resultados de las pruebas y las retroalimentaciones implementando mejoras y optimizaciones en el código y el hardware hasta cumplir con los objetivos establecidos.



Fig. 1. Colocación de electrodos



Fig. 2. Señal de parpadeo

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando el procesamiento de señales adecuado para poder obtener una lectura de la señal analógica proveniente del electrocoulograma, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Se colocaron los electrodos de la manera antes descrita (verde, en la frente; rojo, parte superior del ojo; amarillo, parte inferior del ojo), tal como se muestra en la Figura 1.

2. Seguidamente, se obtuvieron las siguientes señales de manera gráfica de acuerdo al movimiento ocular que se realizaba. Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las señales obtenidas cuando se detecta un parpadeo, un movimiento ocular hacia arriba y un movimiento ocular hacia abajo

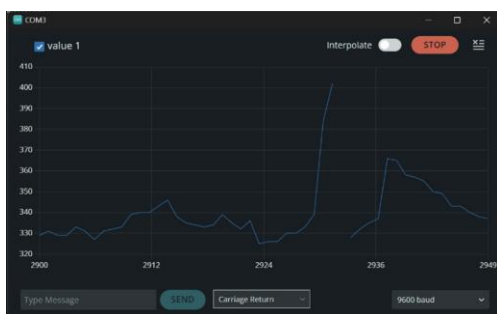


Fig. 3. Señal del movimiento ocular hacia arriba

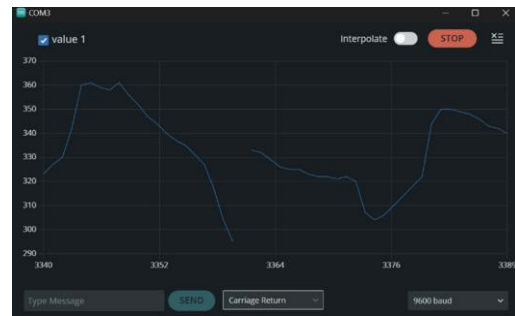


Fig. 4. Señal del movimiento ocular hacia abajo

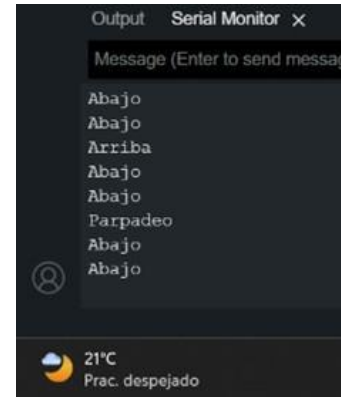


Fig. 5. Detección del tipo de movimiento ocular realizado

3. Además de eso, se mostraba la detección del tipo de movimiento que se realizaba en el monitor serial del Entorno de Desarrollo Integrado Arduino IDE, como se muestra en la Figura 5.

Como se pudo notar en las imágenes anteriormente mencionadas, la señal no se apreciaba lo suficientemente limpia. Por esta razón es que se decidió utilizar MATLAB para mejorar aún más la visualización de la gráfica.

Dentro de la estructura para elaborar el código, se determinaron las siguientes fases:

- 1) Limpiar Consola y Gráficos: Se colocaron las funciones `clear`, `clc` y `clf` para Borra todas las variables en el espacio de trabajo, limpiar la ventana de comandos y limpiar todas las figuras existentes respectivamente.
- 2) Bloque try-catch: se inició un bloque “try”, que intentará ejecutar el código dentro de él. Este bloque capturará posibles errores durante la ejecución del código.
- 3) Inicialización del Arduino: se creó una instancia del objeto arduino y se estableció una conexión con el Arduino en el puerto COM3.
- 4) Configuración de la Gráfica: se programó una gráfica animada (`animatedline`) y se configuró el eje X como el tiempo y el eje Y como el voltaje. Se definieron etiquetas y título para la gráfica. Se establecieron límites para el eje Y entre 0.5 y 2.5 milivoltios.
- 5) Configuración del Tiempo Inicial: con la función `date-time`, se registró el tiempo actual (del momento) como

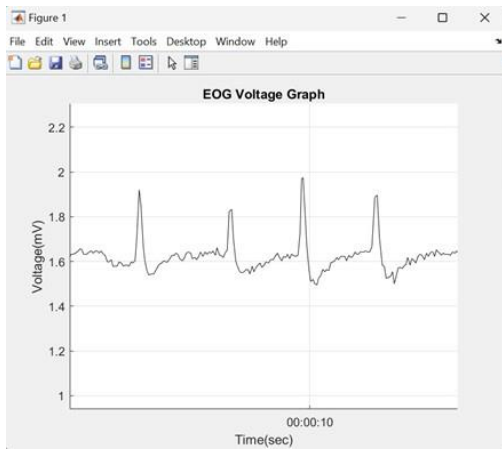


Fig. 6. Señales de parpadeos

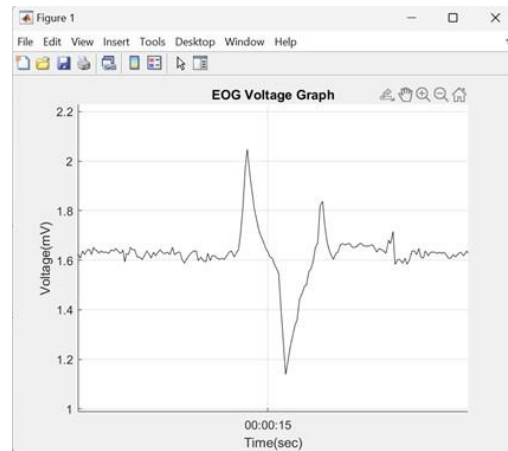


Fig. 7. Señal de movimiento ocular hacia arriba

- el tiempo inicial.
- 6) Bucle principal: con la sintaxis while 1, se creó un bucle infinito.
  - 7) Lectura del Voltaje: con la función readVoltage, se leyó el valor de voltaje de salida desde el puerto analógico A0 del Arduino.
  - 8) Limitación del Rango de Voltaje: con máximos y mínimos, se limitó el valor del voltaje a un rango específico (entre 0.5 y 2.5 milivoltios).
  - 9) Obtención del Tiempo Actual: con la misma función de datetime anterior, se calculó el tiempo transcurrido desde el tiempo inicial.
  - 10) Actualización de la Gráfica: por medio de addpoint, se añadieron puntos a la gráfica animada. Se actualizaron los límites del eje X para mostrar solo los últimos 10 segundos de datos. Con drawnow limitrate, se actualizó la gráfica y se limitó la velocidad de actualización para evitar un consumo excesivo de recursos.
  - 11) Manejo de Errores o Desconexión del Arduino: con catch, se pretendió capturar cualquier error que pueda ocurrir durante la ejecución del código y mostrar un mensaje 'Error o Arduino desconectado.' en la ventana de comandos. También se programó para limpiar las variables y cerrar la figura en caso de error o desconexión del Arduino.

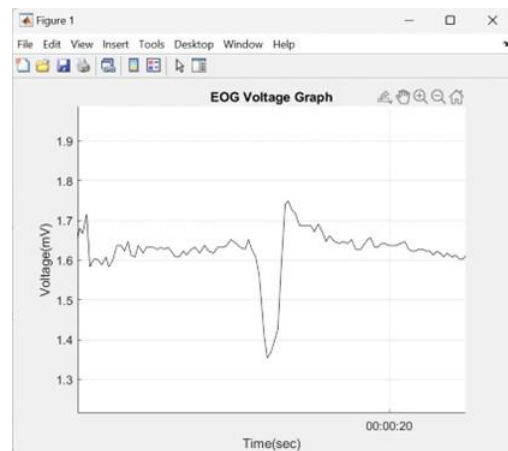


Fig. 8. Señal de movimiento ocular hacia abajo

Con esta estructura de código, se logró las respuestas mostradas en la Figura 6, 7 y 8:

A partir de estas señales que se veían en la gráfica en tiempo real, se estimaron umbrales para poder especificar el tipo de movimiento que estaba ocurriendo en tiempo real. Con condiciones "if", se obtuvo la capacidad de verificar el valor del voltaje y, de esta manera, mostrar mensajes de "Parpadeo", "Arriba" y "Abajo" en la ventana de comandos según los umbrales definidos.

Por último, la Figura 9 muestra diagrama de control que se utilizó para la adquisición de la señal.

Para explicar más a fondo los resultados expuesto, es importante mencionar que para poder utilizar el Arduino UNO

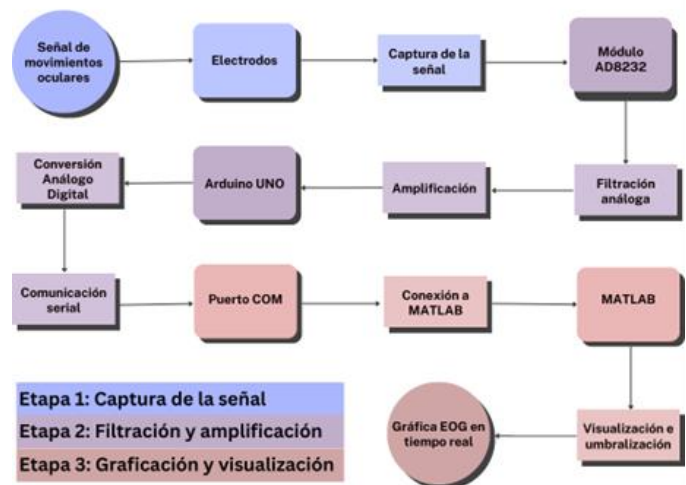


Fig. 9. Proceso final para la adquisición de la señal



con MATLAB, se tuvieron que descargar dos librerías dentro del software:

- Matlab Support Package for Arduino Hardware
- Simulink Support Package for Arduino Hardware

Estos son paquetes de soporte para MATLAB y Simulink respectivamente, que permiten la conexión y comunicación con hardware Arduino. Estas librerías son importantes porque brindan una interfaz fácil y eficiente para integrar la programación en MATLAB y Simulink con proyectos que involucran placas Arduino.

De igual forma, se analizó que para optar por la ampliación del proyecto, se recomienda explorar la viabilidad de reducir las dimensiones del dispositivo con el fin de mejorar su portabilidad y facilidad de uso. La miniaturización podría facilitar su integración en gafas o dispositivos portátiles, lo que ampliaría su accesibilidad en diversos escenarios.

Además, es sugerible profundizar en las técnicas de procesamiento de señales para mejorar la calidad y claridad de las representaciones gráficas obtenidas a través de la electrooculografía. Esto implicaría explorar métodos de filtrado y técnicas de visualización que permitan una interpretación más precisa y detallada de los movimientos oculares capturados.

Se planteó la posibilidad de ampliar la capacidad de detección del dispositivo electrooculográfico mediante la exploración del uso de más electrodos para capturar movimientos oculares en múltiples direcciones. Esto permitiría una interpretación más precisa de los datos obtenidos.

Finalmente, se debe investigar las posibles aplicaciones terapéuticas del dispositivo de electrooculografía en campos como la rehabilitación visual o el monitoreo de trastornos neurológicos. Evaluar cómo el dispositivo podría utilizarse para mejorar la calidad de vida de pacientes con afecciones visuales o neurológicas sería de gran importancia en este sentido.

#### IV. CONCLUSIONES

La implementación del proyecto de electrooculograma ha facilitado la recolección de datos importantes sobre los movimientos oculares, proporcionando una fuente de información continua y en tiempo real. Una investigación metódica sobre la ubicación exacta de los electrodos ha sido fundamental para capturar con precisión estos movimientos.

El electrooculograma se ha establecido como una herramienta eficiente para registrar y analizar las señales eléctricas derivadas de la actividad ocular. Su uso ha enriquecido nuestra comprensión de la dinámica eléctrica de los movimientos oculares, ofreciendo una base robusta para futuros análisis.

La incorporación de conocimientos anatómicos oculares ha resultado ser clave para la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos. La sinergia entre la teoría y la práctica ha posibilitado la creación de representaciones gráficas detalladas en MATLAB, lo que ha mejorado la interpretación

de las señales. Este proyecto subraya la relevancia de aplicar conocimientos teóricos a la investigación biomédica práctica, demostrando su valor en el avance científico.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) por facilitar parte de los recursos esenciales para la realización de este proyecto. Asimismo, deseamos reconocer a todos los profesores que brindaron su orientación y respaldo a lo largo de la investigación. Valoramos el estímulo constante y la motivación proporcionados, los cuales nos han inspirado a seguir persiguiendo nuestras metas académicas.

#### REFERENCIAS

- [1] N. Barbara, T. A. Camilleri, y K. P. Camilleri, «Real-time continuous EOG-based gaze angle estimation with baseline drift compensation under stationary head conditions», *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 86, p. 105282, sep. 2023, doi: 10.1016/j.bspc.2023.105282.
- [2] A. López, J. R. Villar, M. Fernández, y F. J. Ferrero, «Comparison of classification techniques for the control of EOG-based HCIs», *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 80, p. 104263, feb. 2023, doi: 10.1016/j.bspc.2022.104263.
- [3] M. A. Parra, «Método para el estudio de los movimientos oculares», *Colomb. Médica*, vol. 35, n.o 2, pp. 55-61, 2004.
- [4] L. Gila, A. Villanueva, y R. Cabeza, «Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares», en *Anales del sistema sanitario de Navarra, SciELO Espana*, 2009, pp. 9-26. Accedido: 2 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v32s3/original2.pdf>
- [5] A. Segade García, R. Pérez García, M. Bande Neira, y X. B. Otero Costas, «Interés clínico de la electrooculografía: Valoración del índice de Arden», *Arch. Soc. Esp. Oftalmol.*, vol. 41, n.o 9 (SEP), pp. 968-979, 1981.
- [6] W. Pereira y F. Porras, «Movimientos oculares normales.», Accedido: 4 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://www.centroequilibra.com/uploads/2/1/2/3/2123449/movimientos\\_oculares\\_normales.pdf](http://www.centroequilibra.com/uploads/2/1/2/3/2123449/movimientos_oculares_normales.pdf)
- [7] «Educación Inclusiva». Accedido: 4 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://www.riate.org/version/v1/materiales\\_en\\_prueba/e\\_inclusiva\\_discapacidad/unidad\\_1/mo1\\_globo\\_ocular.htm](http://www.riate.org/version/v1/materiales_en_prueba/e_inclusiva_discapacidad/unidad_1/mo1_globo_ocular.htm)
- [8] Riveros, Rodrigo; García, Catalina; Aparicio, Andrés; Hojas, Ana M.; Figueroa, Pablo; Lange, Magdalena; Angulo, Verónica; Olguín, Polín; Rosas, Ricardo, «Tecnología, acompañamiento psicológico y neuropsicología: tres vías para salir del síndrome de enclaustramiento», *Revista Chilena de Neuropsicología*, vol. 9, núm. 1, 2014, pp. 14-20, 2014.
- [9] T. T. Brunyé, T. Drew, D. L. Weaver, and J. G. Elmore, «A review of eye tracking for understanding and improving diagnostic interpretation.» *Cognitive Research: Principles and Implications*, vol. 4, no. 1, Feb. 2019, doi: 10.1186/s41235-019-0159-2.
- [10] I. Cifuentes, «Detección de pestaños basado en análisis de una señal de movimiento ocular.» Sep. 22, 2020. <https://ri.itba.edu.ar/entidades/proyecto%20final%20de%20grado/a3bbe80c-9a40-4fc7-a482-0cbda1216fad>
- [11] F. Sánchez, T. Romaguera y C. Vásquez, «Sistema de estimulación y registro del movimiento ocular con el empleo de la videoculografía infrarroja», *MEDISAN*, vol. 24, n.º 3, 2020, art. n.º 3.
- [12] G. Palomino-Roldán, E. Suaste-Gómez, y A. Castañeda-Galván, «Metodología para el registro de los movimientos oculares y de la cabeza con propósitos de diagnóstico del sistema vestibular», *MCNIB*, vol. 3, n.º 1, pp. 104-107, ago. 2017.
- [13] C. Gutiérrez, Registro de movimientos oculares con el eye tracker Mobile eye XG. Bogotá: Univ. Catol. Colomb., 2018.
- [14] O. Rivera, M. Chacón y J. Ramírez, «RECONOCIMIENTO DE MOVIMIENTO OCULAR MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SEÑALES EEG», *Mem. ELECTRO*, vol. 40, pp. 256-261, octubre de 2018.
- [15] L. Figueroa, «Análisis de señales EEG para detección de eventos oculares, musculares y cognitivos», trabajo de master, Univ. Politéc. Madr., Madrid, 2016.
- [16] D. Ortega Valiente, «Electrodos de ECG, qué son y qué tipología existe.» 29 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.mevesur.com/blog/noticias/electrodos-de-ecg-que-son-y-que-tipologia-existe>. [Último acceso: 6 Noviembre 2023].

- [17] U. Electronics, «AD8232 ECG Módulo Monitor de Pulso Cardíaco,» 2023. [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/ad8232-ecg-modulo-monitor-de-pulso-cardiaco/>. [Último acceso: 6 Noviembre 2023].
- [18] Y. Fernandez, «Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno,» 23 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>. [Último acceso: 6 Noviembre 2023].
- [19] Barcelona Ophthalmic Center, "Electrooculography or electrooculogram | Institut Català de Retina," ICR, 2018. <https://icrcat.com/tratamientospruebas/electrooculograma/#:~:text=The%20electrooculogram%20is%20an%20examination,o%20close%20of%20an%20ear>