



# **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Facultad de Ciencias de la Computación**

## **“Prototipo domótico controlado por señales de electrooculografía”**

Tesis presentada para obtener el grado de:  
**Maestría en Ciencias de la Computación**

Presenta

**Ana Paola Rojas Martínez**

Director de tesis

**Maya Carrillo Ruiz**

Codirector de tesis

**Juan Francisco Leyva Bonilla**

**Puebla, Puebla. Enero, 2026**



## Agradecimientos

Esta etapa de mi vida fue tan emocionante como complicada, por fin uno de mis sueños que era estudiar en la misma escuela que mis padres, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se hizo realidad. Ahora que finalizo mis estudios me encuentro muy agradecida por lo que he aprendido y porque se amplió mi ambición por nuevo conocimiento.

Mi paso por la universidad sentí que fue breve pero que me marco profundamente. Agradezco a los profesores de la Facultad de Ciencias de la Computación y especialmente a quien es mi directora de tesis, la doctora Maya Carrillo Ruiz por ser una guía durante los dos años de mi maestría, le agradezco su paciencia y la manera en la que me enseñó para darme cuenta de lo que era capaz. Igualmente, disfrute mucho mis clases con mi coasesor, el doctor Juan Francisco Leyba Bonilla, he de confesarle que siempre me fueron difíciles sus clases, pero agradezco por hacerlas entendibles para mí. Si continuo con cada profesor, creo que tendría que mencionar a todos los profesores del área de cómputo matemático, especialmente al doctor Alfonso Garcés Báez, el doctor Pedro García Juárez y al doctor Rogelio González Velázquez, de verdad disfrute cada clase y el aprendizaje que me lleve de cada una.

A quien quisiera agradecer especialmente es a Luis Felipe Rojas Martínez, quien como mi hermano siempre me ha acompañado en todo momento y más aún estudiando juntos lejos de casa, sé que la vida traerá cosas maravillosas para ti hermano y espero estar ahí para apoyarte como hiciste conmigo. Además, quisiera reconocer a mis padres, Antolin Rojas Vera y Paula Martínez Solis por permitirme seguir mis sueños y apoyarme en todo momento, gracias por sus enseñanzas, por los ánimos que me daban en cada llamada y por estar presentes en todos los momentos importantes de mi vida. Finalmente, una persona que ahora es una parte muy importante de mi vida y a quien conozco desde niño, mi prometido Heber Abdiel Morales Desales, gracias por acompañarme en esas últimas desveladas y apoyarme en cada paso que doy.

Por último quisiera mencionar una última parte de mi vida, mi mascota que me acompañó durante mi infancia y que el año pasado se fue, pulga te quiero mucho donde sea que estes.

## Resumen

La electrooculografía es una prueba que registra señales generadas por la diferencia de potencial corneo-retina cuando ocurre un cambio en el estado de reposo ocular. Con el objetivo de mejorar la comodidad, independencia y seguridad de una persona con habilidades físicas y del habla limitadas. Se implementó un prototipo domótico controlado mediante señales de electrooculografía. Esta investigación se centró en el análisis e identificación de dichas señales para ser usadas en el control de dispositivos eléctricos dentro de una habitación.

Para este propósito, las señales se procesaron mediante un análisis tiempo-frecuencia, realizando tres experimentos diferentes en los que se variaron los parámetros calculados por señal en cada caso. Posteriormente, los datos correspondientes a las representaciones de cada señal se clasificaron empleando redes neuronales (angosta, media, ancha bilateral y trilateral) y la máquina de soporte vectorial con diferentes kernel (lineal, cuadrático, cúbico, gaussiano fino, medio y grueso).

Los resultados se analizaron considerando el tiempo de entrenamiento, la velocidad de predicción y el tamaño del modelo completo. Dichos criterios, fueron determinantes en la elección del clasificador que identificaría las señales de electrooculografía. Una vez realizada la comparación de los modelos, el clasificador seleccionado fue una red neuronal bilateral combinada con un análisis en tiempo de las señales. Este clasificador, obtuvo una exactitud de 97.9% en la clasificación de señales de electrooculografía.

Finalmente, se construyó un prototipo domótico que permite a personas con habilidades físicas y del habla limitadas controlar dispositivos eléctricos dentro de una habitación. El prototipo domótico se diseñó con componentes eléctricos fácilmente reemplazables, con la finalidad de escalar el sistema a un entorno real. Con el microcontrolador Arduino y el paquete de soporte de MATLAB para Arduino, se estableció comunicación entre el clasificador y el circuito eléctrico. El resultado, fue un prototipo domótico controlado por señales de electrooculografía.

## Contenido

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen .....                                                                                     | 4  |
| Capítulo 1. Introducción .....                                                                    | 8  |
| 1.1. Motivación.....                                                                              | 8  |
| 1.2. Descripción del problema.....                                                                | 9  |
| 1.3. Objetivos generales y específicos.....                                                       | 9  |
| 1.4. Estructura de la tesis .....                                                                 | 9  |
| Capítulo 2. Marco teórico.....                                                                    | 10 |
| 2.1. Sistema oculomotor .....                                                                     | 10 |
| 2.2. Señal de electrooculografía .....                                                            | 13 |
| 2.3. Transformada wavelet.....                                                                    | 17 |
| 2.4. Clasificación .....                                                                          | 19 |
| 2.5. Automatización del hogar.....                                                                | 22 |
| Capítulo 3. Estado del arte.....                                                                  | 23 |
| Capítulo 4. Metodología .....                                                                     | 24 |
| 4.1. Etiquetación de señales.....                                                                 | 24 |
| 4.2. Extracción de características .....                                                          | 28 |
| 4.3. Clasificación .....                                                                          | 29 |
| 4.4. Interfaz de control: procesamiento Arduino .....                                             | 29 |
| 4.5. Construcción de prototipo domótico .....                                                     | 31 |
| Capítulo 5. Experimentos y resultados .....                                                       | 33 |
| 5.1. Experimento 1. Caracterización en función del tiempo. ....                                   | 33 |
| 5.2. Experimento 2. Caracterización en función del tiempo y características de una<br>señal. .... | 34 |
| 5.3. Experimento 3. Caracterización en función del tiempo – frecuencia.....                       | 36 |
| 5.4. Producto Final.....                                                                          | 38 |
| Capítulo 6. Conclusión y trabajo a futuro.....                                                    | 40 |
| 6.1. Conclusión.....                                                                              | 40 |
| 6.2. Trabajo a futuro .....                                                                       | 40 |
| Bibliografía.....                                                                                 | 41 |

## Índice de imágenes

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Vista lateral de los músculos extrínsecos del bulbo ocular [3]. .....                                                       | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Ejes sobre los que se producen los movimientos del bulbo ocular [3]. .....                                                  | 11 |
| <b>Figura 3.</b> Movimientos binoculares y músculos que los producen, todos los movimientos se inician desde la posición primaria [4]. ..... | 12 |
| <b>Figura 4.</b> Partes del ojo humano. ....                                                                                                 | 13 |
| <b>Figura 5.</b> Disposición de electrodos para captar señales de electrooculografía [6]. .....                                              | 13 |
| <b>Figura 6.</b> Captación de señales oculares, potencial del dipolo ocular respecto al movimiento de los ojos [4]. .....                    | 14 |
| <b>Figura 7.</b> Características de una señal. ....                                                                                          | 14 |
| <b>Figura 8.</b> Ejemplo de ventana rectangular. ....                                                                                        | 15 |
| <b>Figura 9.</b> Filtros de la transformada. ....                                                                                            | 18 |
| <b>Figura 10.</b> Ejemplo de separación de hiperplano de una máquina de soporte vectorial. ....                                              | 19 |
| <b>Figura 11.</b> Funcionamiento de una neurona artificial. ....                                                                             | 20 |
| <b>Figura 12.</b> Funcionamiento de una neurona artificial. ....                                                                             | 21 |
| <b>Figura 13.</b> Arquitectura del prototipo domótico. ....                                                                                  | 24 |
| <b>Figura 14.</b> Esquema de tiempo de un ensayo. ....                                                                                       | 25 |
| <b>Figura 15.</b> Modelo trigonométrico de los ángulos objetivo sobre la pantalla. ....                                                      | 26 |
| <b>Figura 16.</b> Movimiento hacia la izquierda. ....                                                                                        | 27 |
| <b>Figura 17.</b> Movimiento hacia la derecha. ....                                                                                          | 27 |
| <b>Figura 18.</b> Movimiento hacia arriba. ....                                                                                              | 27 |
| <b>Figura 19.</b> Movimiento hacia abajo. ....                                                                                               | 28 |
| <b>Figura 20.</b> Simulación de circuito eléctrico de prototipo domótico. ....                                                               | 30 |
| <b>Figura 21.</b> Base de maqueta, vista desde la zona representativa de una habitación. ....                                                | 31 |
| <b>Figura 22.</b> Conexiones eléctricas del sistema de iluminación y ventilación. ....                                                       | 32 |
| <b>Figura 23.</b> Arduino Uno, modulo controlador L298N y batería de 9V. ....                                                                | 32 |
| <b>Figura 24.</b> Sistema de apertura y cierre de ventanas. ....                                                                             | 32 |
| <b>Figura 25.</b> Prototipo domótico, vista desde la zona representativa de una habitación. ....                                             | 38 |
| <b>Figura 26.</b> Prototipo domótico, vista de circuito eléctrico. ....                                                                      | 39 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Estado del arte.....                                                                                                          | 23 |
| <b>Tabla 2.</b> Esquema de tiempo de experimento. ....                                                                                        | 25 |
| <b>Tabla 3.</b> Características extraídas de las señales EOG.....                                                                             | 28 |
| <b>Tabla 4.</b> Descripción de componentes eléctricos y sistemas que controlan.....                                                           | 30 |
| <b>Tabla 5.</b> Relación entre los movimientos oculares y componentes eléctricos. ....                                                        | 31 |
| <b>Tabla 6.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo empleando Redes Neuronales. ....                                    | 33 |
| <b>Tabla 7.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo empleando Máquina de Soporte Vectorial con diferentes kernels. .... | 33 |
| <b>Tabla 8.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo empleando NN. ....                                                  | 34 |
| <b>Tabla 9.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo empleando SVM con diferente kernel. ....                            | 35 |
| <b>Tabla 10.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo – frecuencia empleando NN. ....                                    | 36 |
| <b>Tabla 11.</b> Resultados de clasificación con características de tiempo – frecuencia empleando SVM con diferente kernel.....               | 37 |
| <b>Tabla 12.</b> Comparación de clasificadores con mejores resultados de exactitud. ....                                                      | 38 |

# Capítulo 1. Introducción

A continuación, se presenta la motivación para el desarrollo de este proyecto, descripción del problema, objetivos generales y específicos y la estructura de este documento.

## 1.1. Motivación

El auge tecnológico continuamente repercute en nuestra vida diaria y ha cambiado la manera en la que nos relacionamos con nuestro entorno. Un ejemplo claro en nuestros hogares es la llegada de los altavoces inteligentes y con ellos la implementación de la domótica. Si bien el lanzamiento del primer altavoz comercial exitoso fue en 2014 con el Amazon Echo junto a él asistente virtual Alexa, fue años más tarde que inicio su popularización. Los altavoces inteligentes con asistentes virtuales funcionaron como un puente de comunicación nuevo entre humanos y dispositivos electrónicos, anteriormente funcionando solo con la acción mecánica de interruptores o botones y cambiando a la activación por sonido y movimiento (físicamente no ligado al circuito eléctrico de los dispositivos).

Este cambio genero facilidades como la reproducción de música, búsquedas rápidas de información y, en lo que se enfoca este trabajo, controlar dispositivos electrónicos de nuestro hogar. Los cambios generados originaron la siguiente pregunta: ¿todo tipo de persona fue beneficiado? Si bien, para la mayor parte de la población pareciera un acierto, hay sectores de la población que aún no alcanza los beneficios de esta tecnología. Una de las razones, es el tipo de comunicación admitido por los altavoces inteligentes, la cual no resulta beneficiosa para ciertos sectores de la población. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) se calcula que 1300 millones de personas (1 de cada 6 personas) sufren una discapacidad importante [1]. Y para México la cifra no es más favorable, según datos de la ENADID (Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica) del 2014, 7.1 millones de habitantes del país no pueden o tienen mucha dificultad para hacer actividades como: caminar, subir o bajar usando sus piernas; ver (aunque use lentes); mover o usar sus brazos o manos; aprender, recordar o concentrarse; escuchar (aunque use aparato auditivo); bañarse, vestirse o comer; hablar o comunicarse; y problemas emocionales o mentales [2].

A partir de este enfoque, se planteo la construcción de un prototipo domótico controlado por una señal eléctrica generada por nuestro cuerpo, específicamente producida por el movimiento de los ojos, llamada formalmente señal de electrooculografía. De esta manera, el enfoque de este trabajo son personas que tienen alguna discapacidad física y del habla; que, por lo tanto, no les es posible comunicarse fácilmente con quienes los rodean y, además, encuentran dificultad para controlar dispositivos electrónicos de su entorno para regular su comodidad y seguridad.

Con el prototipo domótico se busca que este grupo de personas controle mediante señales de electrooculografía dispositivos electrónicos dentro de su habitación como, por ejemplo: las luces, las persianas de las ventanas, el encendido y apagado de ventiladores y una alarma.

Por supuesto, estos dispositivos electrónicos son un ejemplo propuesto para este trabajo, pero se plantea extender a una mayor cantidad de dispositivos para ofrecer un mayor control e independencia.

## 1.2. Descripción del problema

La capacidad de controlar dispositivos electrónicos en nuestro hogar, una actividad común para algunas personas puede resultar en un reto para otras. Si bien la tecnología nos ofrece alternativas disponibles actualmente en el mercado, aún hay quienes no han resultado beneficiados. Los asistentes virtuales facilitan la interacción entre los humanos y las máquinas, sin embargo, los que existen ahora en el mercado pueden tener ciertas limitaciones en el tipo de comunicación que ofrecen. Por ejemplo, las formas más popularizadas de comunicación son por medio de la voz y gesticulación de movimientos; y para ciertos grupos de personas realizar este tipo de actividades puede suponer un reto. Por ello para este trabajo el objetivo es este grupo reducido de individuos, explorando otras maneras de controlar los dispositivos electrónicos.

En conclusión, este trabajo está enfocado a personas con capacidades físicas y del habla limitadas cuya forma de comunicación resulta más compleja. Empleando una señal biológica producida a partir del movimiento ocular se busca proporcionar a los usuarios del prototipo planteado independencia en el control de su entorno, aportando comodidad y seguridad.

## 1.3. Objetivos generales y específicos

### Objetivo general

Construir un prototipo domótico controlado con señales de electrooculografía que proporcione comodidad a personas con movilidad física limitada dentro de una habitación.

### Objetivos específicos

- a) Definir la arquitectura del prototipo domótico.
- b) Diseñar e implementar la interfaz de control con señales de electrooculografía.
- c) Instalar los elementos de hardware necesarios para el prototipo domótico.
- d) Garantizar el funcionamiento de la interfaz de control para operar sobre el hardware instalado en la habitación.

## 1.4. Estructura de la tesis

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. El capítulo dos presenta el marco teórico con los conceptos importantes para el desarrollo de este proyecto. El capítulo tres el estado del arte. El capítulo cuatro contiene la metodología con las etapas del desarrollo de la construcción del prototipo domótico controlado por señales de electrooculografía. En el capítulo cinco se presentan los resultados de los experimentos junto a un análisis de estos. Finalmente, el capítulo seis contiene las conclusiones y trabajo futuro.

## Capítulo 2. Marco teórico

A continuación, se desarrollan conceptos importantes para el desarrollo y entendimiento de este trabajo. Abarcando desde el sistema oculomotor, origen de los movimientos oculares y por lo tanto de la señal de electrooculografía. Continuando con la captación de las señales, para continuar con las características general de una señal y aquellas calculadas en el dominio del tiempo. Seguidamente, se explica un segundo análisis realizado a las señales en dominio del tiempo-frecuencia empleando la transformada wavelet discreta. Finalmente, se encuentra una explicación sobre los clasificadores empleados durante este trabajo.

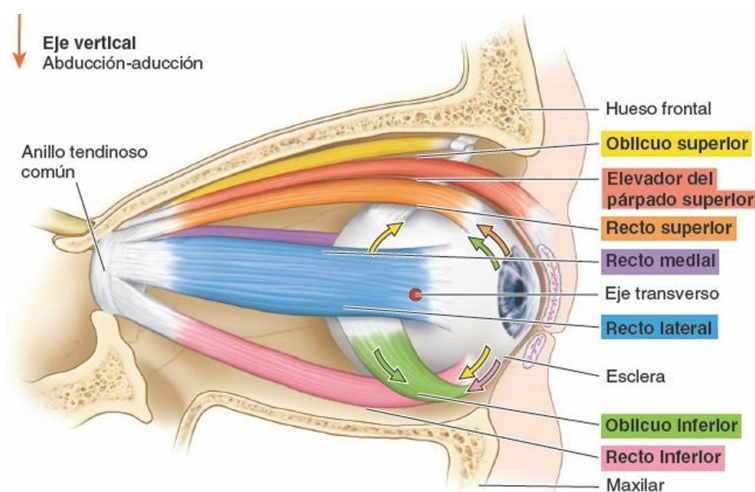
### 2.1. Sistema oculomotor

El ojo es el órgano de la visión y está formado por el bulbo ocular y el nervio óptico. La órbita contiene el ojo y sus estructuras visuales. La región orbitaria es el área de la cara superpuesta a la órbita y al bulbo ocular, e incluye párpados superior e inferior y el aparato lagrimal [3].

Al área del campo visual que es generalmente binocular, que se alcanza con la mirada por el movimiento de los ojos y no por el de la cabeza es denominada área de fijación, esta es el área sobre la que se estará trabajando en este proyecto, ya que todas las señales tomadas se dan a partir de ésta.

Los movimientos simultáneos de ambos ojos en la misma dirección son los movimientos conjugados, el sistema que regula estos movimientos es el sistema motor ocular (oculomotor) [4].

El bulbo ocular contiene el aparato óptico del sistema visual y ocupa la mayor parte de la porción anterior de la órbita, suspendido por seis músculos extrínsecos que controlan sus movimientos y por un aparato suspensor fascial. Mide unos 25 mm de diámetro [3].



**Figura 1.** Vista lateral de los músculos extrínsecos del bulbo ocular [3].

Los músculos extrínsecos del bulbo ocular son: el elevador del párpado superior, cuatro rectos (superior, inferior, medial y lateral) y dos oblicuos (superior e inferior). Estos siete músculos actúan conjuntamente para mover el párpado superior y el bulbo ocular [3] como se muestra en la figura 1.

### 2.1.1. Movimientos oculares

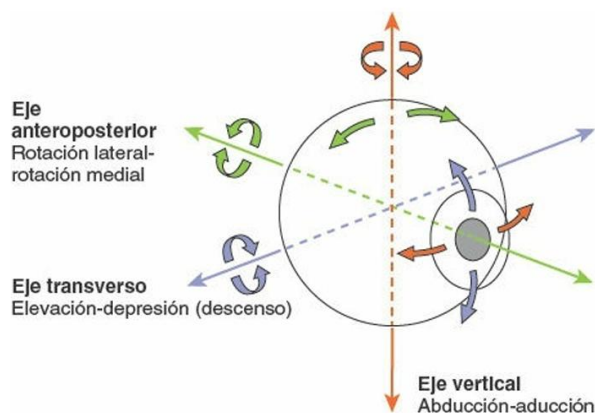
El sistema visual, presenta movimientos tanto voluntarios como involuntarios, durante el día los ojos realizan movimientos pequeños varias veces por segundo, sin ser perceptibles, estos movimientos o micro sacadas producen cierta actividad cerebral no voluntaria por la persona [4]. Otro movimiento involuntario son los parpadeos, que son un reflejo normal para mantener humedecida y lubricada la superficie ocular, funcionando como protección de los ojos.

Por otra parte, entre los movimientos voluntarios encontramos principalmente los movimientos sacádicos y el parpadeo:

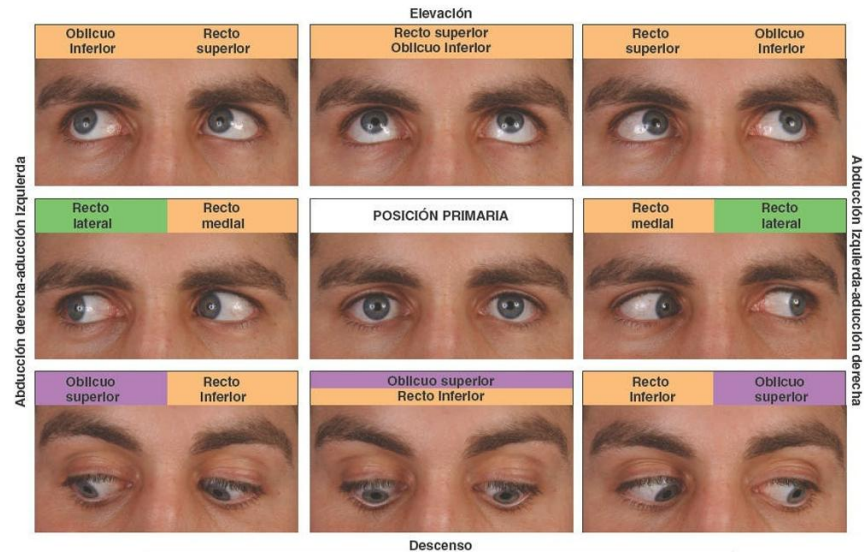
**Movimientos sacádicos:** son desplazamientos angulares muy rápidos y precisos; producidos usualmente para observar con detalle objetos y no requiere de un estímulo inicial para generarse.

Para realizar un movimiento sacádico es necesario que el cerebro calcule la posición del ojo en la órbita y la del objetivo, de acuerdo con la diferencia de estas dos medidas se generan órdenes motoras [5]. Los movimientos se producen por rotación en torno a tres ejes: vertical, transverso y anteroposterior como se observa en la figura 2 y se describen según la dirección del movimiento de la pupila desde la posición primaria ver figura 3 [3].

**Parpadeo:** es un movimiento rápido realizado por los párpados que consiste en abrir y cerrar con diferentes fines, además de protección y lubricación también funciona como forma de comunicación y parte del lenguaje corporal.



**Figura 2.** Ejes sobre los que se producen los movimientos del bulbo ocular [3].



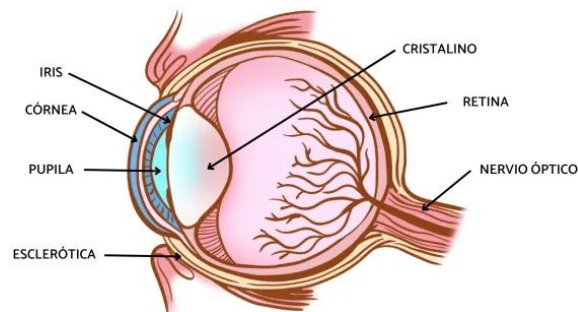
**Figura 3.** Movimientos binoculares y músculos que los producen, todos los movimientos se inician desde la posición primaria [4].

## 2.2. Señal de electrooculografía

Una vez comprendidos los movimientos producidos por el sistema oculomotor, se procede a definir formalmente cómo se origina una señal de electrooculografía.

### 2.2.1. Potencial corneo retiniano.

El ojo humano se comporta como un dipolo eléctrico en donde la córnea y la retina ubicadas en la región frontal y trasera del ojo como se observa en la figura 4, forman los polos positivos y negativos respectivamente, estos polos generan una diferencia de potencial llamado corneo-retina o corneo retiniano que tiene una magnitud variable con un rango de  $0.4 - 1.0mV$ . Los ejes de los dipolos están orientados con el eje ocular, por ello rotan junto con él [6].

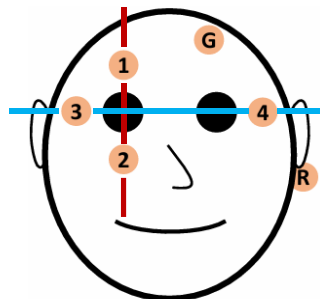


**Figura 4.** Partes del ojo humano.

### 2.2.2 Captación de señales de electrooculografía

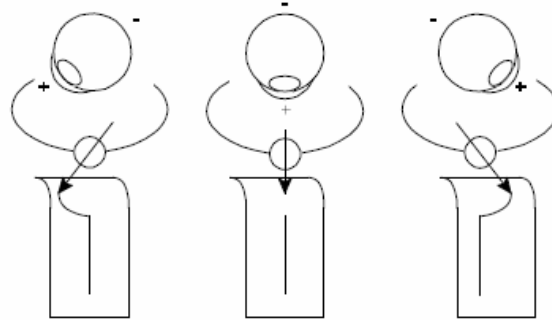
A partir de la diferencia de potencial entre la córnea y la retina, se genera un campo eléctrico con actividad que puede ser registrada de forma no invasiva usando electrodos colocados en el rostro sobre la piel, en sitios próximos al globo ocular en ejes verticales y horizontales discernibles en la figura 5.

Para el registro del movimiento en dirección vertical, se coloca un electrodo en la parte superior del ojo derecho sobre la ceja (punto 1 en la figura 6) y otro en la parte inferior del mismo ojo (punto 2 en la figura 6). Para el movimiento horizontal se colocan los electrodos en las sienes de la persona (puntos 3 y 4 en la figura 6). Finalmente, se colocan dos electrodos más en los puntos G y R mostrados en la figura 6 indicando tierra (ground) y referencia.



**Figura 5.** Disposición de electrodos para captar señales de electrooculografía [6].

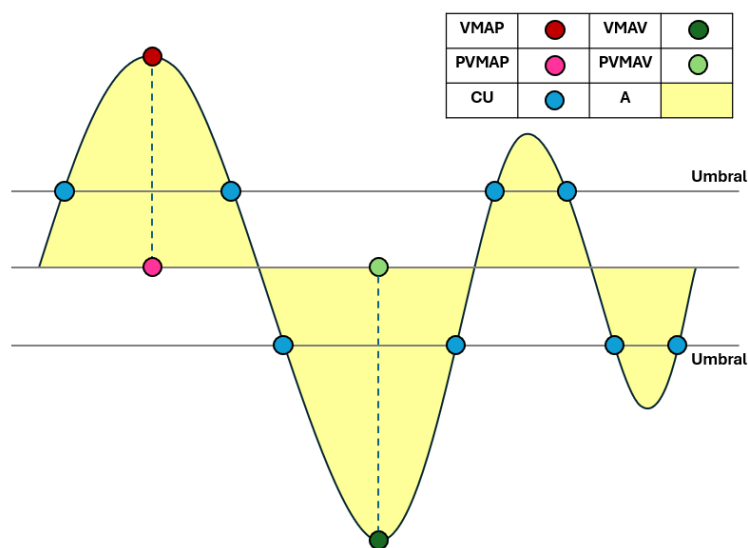
Derivado de este registro, se obtienen las señales de electrooculografía (EOG) cuyas características describe Rafael Barea [7] quien realizó un amplio estudio acerca de estas señales, obteniendo un valor de variación de las señales de EOG de entre  $50$  y  $3500\mu V$  e identificando un comportamiento lineal para ángulos entre  $\pm 30^\circ$ , variaciones posteriores se encuentran ilustradas como ejemplo en la figura 6. Del autor Rojas [8] conocemos la frecuencia de las señales de EOG, la cual varía de  $1 - 50Hz$ .



**Figura 6.** Captación de señales oculares, potencial del dipolo ocular respecto al movimiento de los ojos [4].

### 2.2.2. Características de una señal

Una señal es una perturbación física que transmite información que puede ser medible, tiene diferentes características que son de interés para este trabajo las cuales son el valor máximo de amplitud de pico (VMAP), la posición del valor máximo de amplitud de pico (PVMAP), el valor máximo de amplitud de valle (VMAV), la posición del valor máximo de amplitud de valle (PVMAV), los cruces por umbral (CU) y el área bajo la curva (A) y se observan en la figura 7.



**Figura 7.** Características de una señal.

Un concepto importante para poder entender correctamente la figura anterior es el de umbral, definido como un valor establecido a partir del cual se produce un efecto, en nuestro caso nos ayuda en la caracterización de las señales para su posterior identificación en el tipo de movimiento ocular.

Una vez conocidas algunas características de una señal, debemos tomar en cuenta un parámetro que nos es de ayuda en el estudio de señales y que fue de relevancia para la identificación de atributos en las señales es el ventaneo.

Éste es definido como una operación que consta en seleccionar un numero finito de muestras de una señal, esto es equivalente a multiplicar la señal actual, por una secuencia finita  $w[n]$  llamada datos de ventana o simplemente ventana [9].

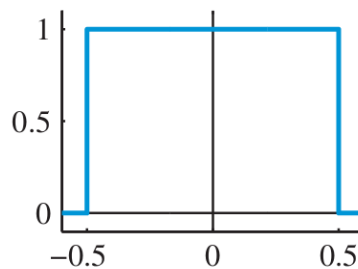
La ventana empleada para este trabajo es la rectangular ilustrada en la figura 8, definida como:

$$w[n] \triangleq \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq L - 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La operación de ventaneo produce una secuencia

$$\hat{x}[n] = w[n]x[n]$$

La cual consiste en tomar  $L$  muestras de  $x[n]$ . El término ventaneo es usado para enfatizar que solo podemos “ver” una parte finita de la señal mediante la ventana [9].



**Figura 8.** Ejemplo de ventana rectangular.

### 2.2.3. Características en el dominio del tiempo

Las señales biomédicas son señales generadas por diferentes sistemas fisiológicos del cuerpo, cada una con características que delimitan las técnicas que se emplearán para su análisis. En el caso de las señales electrooculográficas encontramos diferentes enfoques que podemos usar para extraer información relevante.

Algunas de las características de interés para este proyecto se muestran a continuación y son calculadas directamente de las magnitudes obtenidas a partir de las mediciones discretizadas de la señal [10] [11].

Valor absoluto medio (Mean Absolute Value – MAV)

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (1)$$

$x_i = \text{señal EOG}$

$N = \text{tamaño de la ventana}$

Desviación estándar (Standard deviation – STD)

$$STD = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$\bar{x} = \text{valor absoluto medio}$

Varianza (Variance – Var)

$$Var = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (3)$$

Longitud de forma de onda (Waveform length – WL)

$$WL = \sum_{i=1}^N |x_i - x_{i-1}| \quad (4)$$

Cruce por cero (Zero crossing – ZC)

$$Var = \sum_{i=1}^N \text{sgn}(-x_i x_{i-1}) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & ; \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Energía

$$E = \left[ \sum_{i=1}^N X_i \right]^2 \quad (6)$$

## 2.3. Transformada wavelet

Además de el análisis de características en la señal según el tiempo, fue manejado para este trabajo un segundo planteamiento, el cual es el análisis en tiempo-frecuencia basado en la transformada wavelet discreta.

### 2.3.1. Wavelet

Wavelet es una señal específica que cumple con dos condiciones [12].

- Ser oscilatoria
- Una amplitud distinta a cero durante un intervalo corto.

Las wavelets pueden ser asimétricas y con características que les permiten adaptarse a una señal dependiendo de su tipo. En cuanto a su selección para análisis de señales, se puede tratar identificando cual es similar a nuestra señal o experimentando con diferentes wavelets y tomar la que proporcione mejores resultados [13].

La transformada wavelet es la descomposición de una señal sobre el conjunto de funciones obtenidas de una función llamada wavelet madre por medio de escalamiento y desplazamiento. Existen diferentes tipos de la transformada wavelet, para este trabajo se empleó la transformada wavelet discreta; sin embargo, para entenderla mejor explicaremos a la transformada wavelet continua y los conceptos de escalamiento y desplazamiento.

**Escalamiento:** consiste en ‘estirar’ o ‘encoger’ la señal wavelet en el tiempo. El factor de escalamiento afecta en la detección de frecuencias, con una wavelet más ‘estirada’ se detectan cambios lentos o frecuencias bajas y con una wavelet ‘encogida’ se detectan cambios abruptos o frecuencias altas.

**Desplazamiento:** consiste en retrasar o adelantar el inicio de la wavelet a lo largo de la señal.

Una vez definidos ambos conceptos, podemos definir la wavelet madre  $\psi_{a,b}(t)$ , añadiendo los conceptos de escalamiento y desplazamiento resultando en:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Siendo  $a = \text{escalamiento}$  y  $b = \text{desplazamiento}$ .

### 2.3.2. Transformada wavelet

La transformada wavelet continua (CWT) se define como la suma de la multiplicación de una señal continua y la wavelet madre en su forma desplazada y escalonada  $\psi_{a,b}(t)$ . Tiene forma:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Siendo  $x(t)$  la señal continua.

En este punto, aparecen los coeficientes wavelet derivados del escalamiento y desplazamiento, los cuales indican la relación entre la señal y la wavelet madre. La transformada wavelet discreta (DWT) se obtiene al discretizar los parámetros de desplazamiento y escalamiento, con los siguientes valores:

$$a = 2^{-j}$$

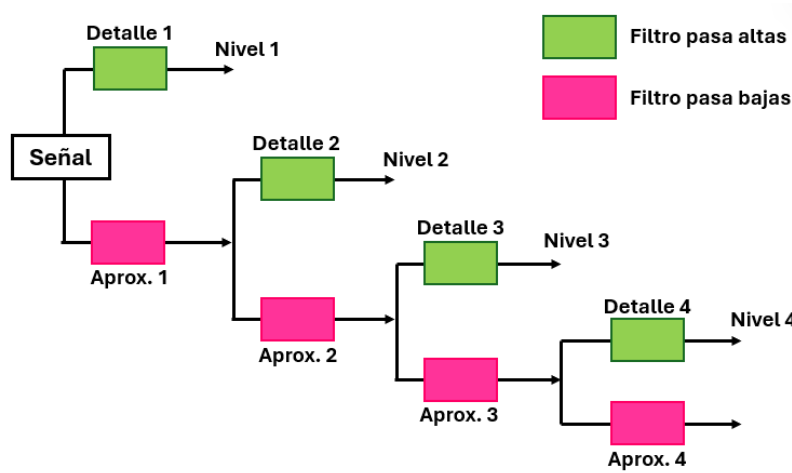
$$b = k2^{-j}$$

Donde  $j$  y  $k$  son números enteros. Permitiendo definir la transformada wavelet discreta.

$$DWT_{j,k} = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi(2^j t - k) dt$$

Donde  $x(t)$  es una señal discreta.

La transformada wavelet discreta de una señal se calcula enviando la señal a través de filtros pasa altas y pasa bajas obteniendo coeficientes de salida de aproximación  $c_{j,k}$  y detalle  $d_{j,k}$  cómo se observa en la figura 9.



**Figura 9.** Filtros de la transformada.

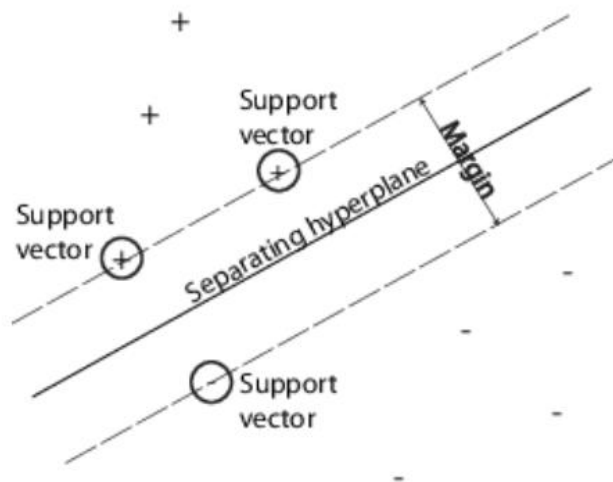
Los coeficientes obtenidos por el filtrado de la señal serán los que tomaremos para calcular los atributos de la señal de electrooculografía, siendo esta la razón de la variación del tamaño de ventana empleada en el experimento 3.

## 2.4. Clasificación

Una vez conocido el proceso desde la generación de las señales, la captación de la señal de electrooculografía y la caracterización de estas. Se presentan a continuación clasificadores que según la literatura detallada en la sección del estado del arte, aportan buenos resultados en la clasificación de señales de electrooculografía.

### 2.4.1. Máquina de Soporte Vectorial

Es un algoritmo de aprendizaje supervisado que clasifica datos encontrando el mejor hiperplano que separa puntos de información de una clase de los puntos de información de otra clase. El mejor hiperplano es aquel que proporciona un mayor margen de separación entre elementos de diferentes clases, recordando que al decir margen nos referimos la anchura máxima marcada por un vector de soporte paralelo al hiperplano que no tiene puntos de datos interiores, concepto mejor explicado por la figura 10 [14].



**Figura 10.** Ejemplo de separación de hiperplano de una máquina de soporte vectorial.

Hay diferentes tipos de SVM, un ejemplo muy común para entender este clasificador es el SVM lineal que es utilizado para datos linealmente separables que tiene exactamente dos clases, para este tipo de problemas el algoritmo solo puede encontrar un hiperplano.

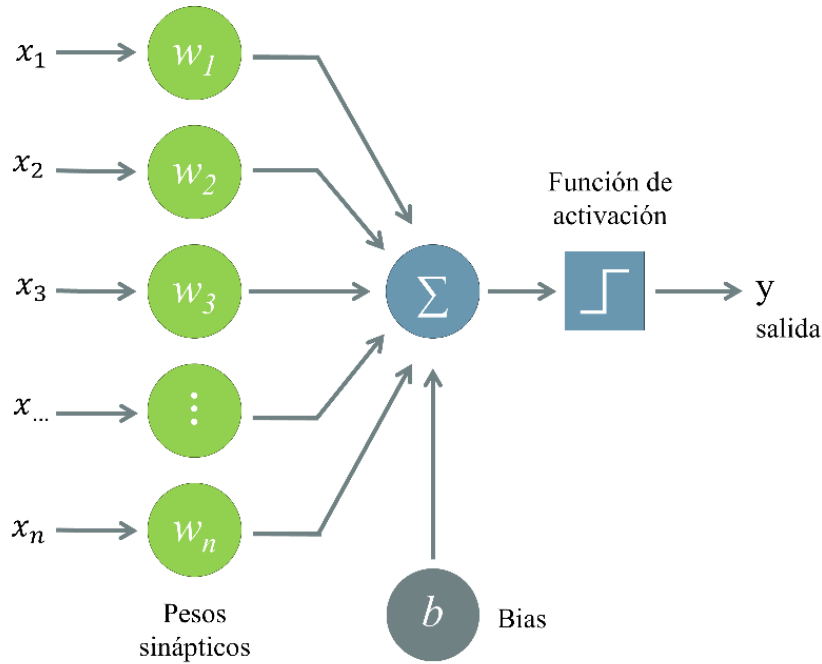
En tareas complejas donde los datos no pueden separarse la SVM puede emplear un margen flexible, separando muchos puntos de los datos, pero no la totalidad de ellos. El algoritmo entonces aumenta el margen flexible permitiendo clasificaciones incorrectas [14].

Otro tipo de SVM son las no lineales, empleadas con datos no linealmente separables, en este caso la SVM utiliza funciones de kernel para transformar las características; un kernel es la función matemática que se utiliza para transformar datos de entrada en datos de mayor dimensionalidad para una identificación más sencilla que permita clasificar los datos minimizando el error cometido [14].

Durante los experimentos con la máquina de soporte vectorial se realizó una variación en la función de Kernel: lineal, cuadrático, cúbico y gaussiano; obteniendo diferentes resultados de los cuales los más destacados se encuentran en la sección de resultados de este trabajo.

#### 2.4.2. Redes neuronales

Una red neuronal artificial es un modelo computacional, inspirado en la red neuronal biológica; por lo tanto, emplea a las neuronas como los bloques que la constituyen. Cada neurona tiene un número  $k$  de conexiones de entrada (inputs) y puede tomar cierto número de estados [15]. Para comprenderlo mejor, podemos entender el funcionamiento de la neurona artificial.

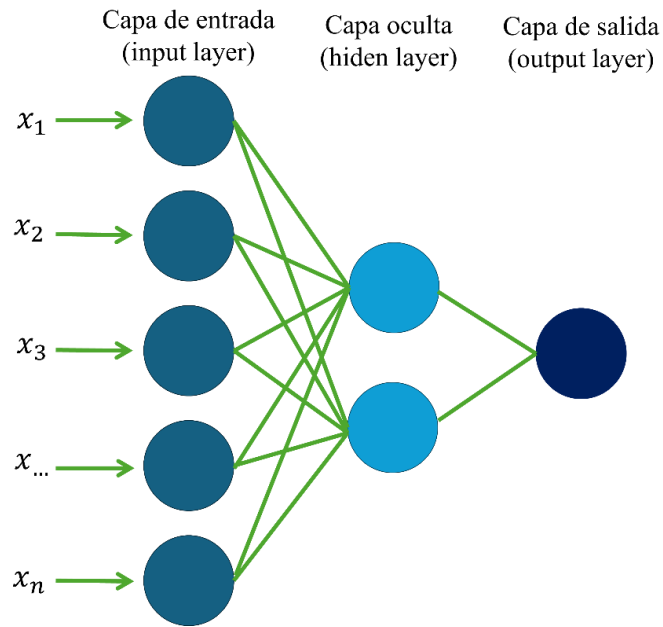


**Figura 11.** Funcionamiento de una neurona artificial.

La neurona recibe  $n$  datos de entrada ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ) y calcula el peso ponderado de estos valores ( $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ) a estos datos se le suma un valor  $b$  que recibe el nombre de bias. Los valores de peso y bias son escogidos durante el entrenamiento de la neurona. El resultado antes de entrar a la función de activación es el siguiente, ecuación 7:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + \dots + x_n w_n + b \quad (7)$$

A continuación, al resultado se le aplica una función de activación, la cual depende de las necesidades del problema en el que se esté trabajando. Una red neuronal básica es el perceptrón simple de la figura 11 la cual posee una capa de entrada y una de salida, sin embargo, para en este trabajo se utilizaron redes neuronales de capa oculta, que son aquellas redes que además de tener las dos capas mencionadas anteriormente tienen capas intermedias como se observa en la figura 12.



**Figura 12.** Funcionamiento de una neurona artificial.

Las redes neuronales puestas a prueba para este trabajo fueron la angosta, media, ancha, bilateral y trilateral cuyo número de neuronas y capas ocultas varía dependiendo del modelo influyendo directamente en el parámetro de exactitud en la clasificación.

## 2.5. Automatización del hogar

Finalmente, se presenta un concepto clave para este trabajo, siendo importante para el desarrollo de la construcción del prototipo. Con este concepto explicamos el último enlace entre identificar una señal de electrooculografía y usarla en algo tangible y útil para el usuario final.

### 2.5.1. Domótica

Según la RAE la domótica es el conjunto de sistemas que automatizan las diferentes instalaciones de una vivienda [16]. El término proviene de la palabra en latín *domus* o “casa” y del griego *autónomo* o “que se gobierna a sí mismo”. Por lo tanto, podemos definir la palabra domótica como los sistemas de automatización o digitalización para la administración de los recursos de una vivienda o edificio de cualquier tipo aportando los servicios para la gestión energética, seguridad, bienestar, accesibilidad y comunicación que puede integrarse con redes de comunicación internas o externas [16].

En este trabajo, uno de los enfoques sobre los beneficios que nos aporta la domótica está en la accesibilidad, enfocándonos en que personas con alguna discapacidad física y del habla tengan acceso a los servicios de su vivienda que se encuentren dentro de su habitación. Además de buscar la accesibilidad, el objetivo es aportar seguridad y bienestar buscando la independencia de la persona en el control de estos aspectos de su vida.

## Capítulo 3. Estado del arte

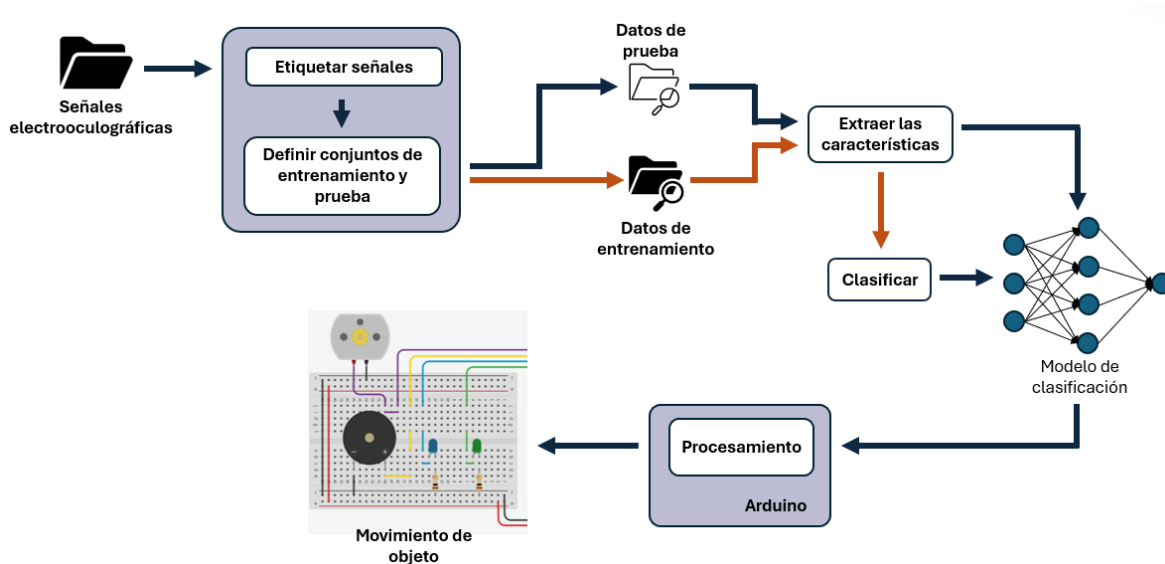
En la tabla 1 podemos observar la información más relevante de trabajos anteriores cuyo estudio fueron las señales biológicas. El trabajo [11] detalla una manera de analizar las señales de electrooculografía en función del tiempo, mientras que en el trabajo [19] introducen la transformada wavelet para el análisis de señales EOG.

**Tabla 1.** Estado del arte.

| Tipo de señal | Dominio de análisis                    | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Clasificador                                                           | Aplicación                                                                     | Año  | Fuente |
|---------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|--------|
| EOG           | Tiempo                                 | Valor máximo de amplitud de pico y posición, valor máximo de amplitud de valle y posición, valor del área bajo la curva, número de cruces por umbral.                                                                                                                                                                              | N/A                                                                    | Análisis de características útiles para identificar tipos de señales EOG.      | 2011 | [11]   |
| EMG           | Tiempo y frecuencia                    | Tiempo: valor absoluto medio, desviación estándar, varianza, longitud de onda, cruce en cero, etc.<br>Frecuencia: longitud de onda, frecuencia media, frecuencia mediana, media de picos, desviación estándar de picos, picos de frecuencia, energía de frecuencia, etc.                                                           | K-nearest neighbor, SVM                                                | Análisis de algoritmos para reconocimiento de movimientos musculares en manos. | 2018 | [10]   |
| EOG y EEG     | Análisis de componentes independientes | Derivada de la señal, cálculo de energía con 3 valores de datos de la derivada y selección de la energía máxima entre 5 valores de energía.                                                                                                                                                                                        | Discriminative graph regularized extreme learning machine (GELM) y SVM | Controlar un juego “serio” con señales EOG.                                    | 2018 | [17]   |
| EOG           | Tiempo-frecuencia                      | Análisis de Wavelet de tres niveles, no se define que familia usar.                                                                                                                                                                                                                                                                | SVM                                                                    | Transmisión de datos EOG con tecnología inalámbrica                            | 2018 | [18]   |
| EOG           | Tiempo-frecuencia                      | Uso de la transformada wavelet continua en movimientos sacádicos. Empleo de Haar madre wavelet<br>Movimiento sacádico: media, varianza, máxima amplitud de la señal, tasa más pequeña o grande, sacadas positivas o negativas en dirección horizontal o vertical.<br>Parpadeo: media, varianza de la duración del parpadeo o tasa. | SVM                                                                    | Análisis de EOG para el reconocimiento de movimiento ocular.                   | 2011 | [19]   |

## Capítulo 4. Metodología

En esta sección se describe la arquitectura del prototipo domótico propuesto para este trabajo, misma que se observa en la figura 13 y es desglosado a continuación con la explicación de cada uno de sus componentes.



**Figura 13.** Arquitectura del prototipo domótico.

### 4.1. Etiquetación de señales

Este módulo de la arquitectura recibe las señales de EOG discretizadas, es decir, señales formadas por una variación de la diferencia de potencial eléctrico corneo retiniano en función del tiempo, cada señal que entra a este módulo es un movimiento sacádico del cual definiremos su orientación (movimiento sacádico hacia arriba, movimiento sacádico hacia abajo, movimiento sacádico hacia la derecha, movimiento sacádico hacia la izquierda y parpadeo).

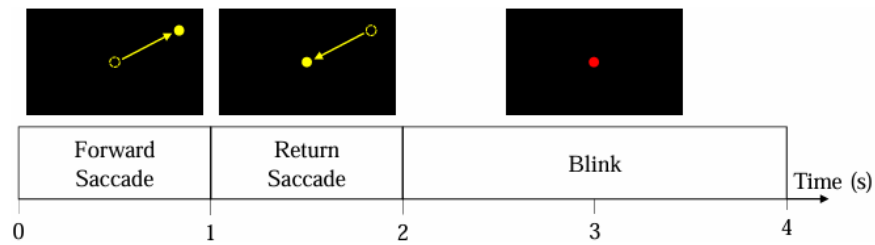
El conjunto de datos empleados para este proyecto es de L-Università tà Malta [20] usada por los autores Barbada Nathaniel, A. Camilleri Tracey y P. Camilleri Kenneth para analizar técnicas de mitigación de deriva en la línea base [21]. Consiste en señales de electrooculografía tomadas a partir de movimientos sacádicos y de parpadeo.

La base de datos registra mediciones electrooculográficas de seis personas (2 hombres y 4 mujeres con un rango de edad de  $24 \pm 3.1$  años) con una visión normal o corregida a normal. Para la toma de las señales, los usuarios fueron sentados aproximadamente a 60 cm de un monitor LCD de 24 in con su cabeza inmovilizada con un sistema similar a un oftalmoscopio. A los usuarios se les indicó fijar su mirada en un punto color amarillo en una pantalla negra y seguirla a movimientos aleatorios a los que se moverá el punto amarillo en la pantalla, posteriormente regresar al punto central de la pantalla y parpadear en el cambio de color del

punto. Por lo tanto, los ensayos de una duración de 4 segundos se explican a continuación y en la figura 14 y tabla 2.

**Tabla 2.** Esquema de tiempo de experimento.

| Segundo | Acción                                                                                        |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Movimiento sacádico del punto central de la pantalla a un punto aleatorio.                    |
| 2       | Movimiento sacádico del punto aleatorio del segundo anterior al punto central de la pantalla. |
| 3 – 4   | Parpadeo al cambio de color del punto.                                                        |



**Figura 14.** Esquema de tiempo de un ensayo.

En total, por cada sujeto se tienen 300 ensayos. Los correspondientes movimientos fueron registrados usando una configuración estándar EOG mostrada en la figura 5. La configuración de los electrodos se observa con un total de 6 electrodos colocados sobre el rostro. Los electrodos 1 y 2 fueron colocados en la parte superior e inferior del ojo, los electrodos 3 y 4 colocados adyacentes en las sienes laterales, el electrodo ('G') corresponde a la tierra y el electrodo ('R') es el electrodo de referencia.

Con una configuración estándar de los electrodos los autores obtuvieron la diferencia de potencial EOG entre la alineación horizontal y vertical para producir los componentes EOG horizontales y verticales, de acuerdo con las ecuaciones (8) y (9):

$$EOG_h(t) = V_3(t) - V_4(t) \quad (8)$$

$$EOG_v(t) = V_1(t) - V_2(t) \quad (9)$$

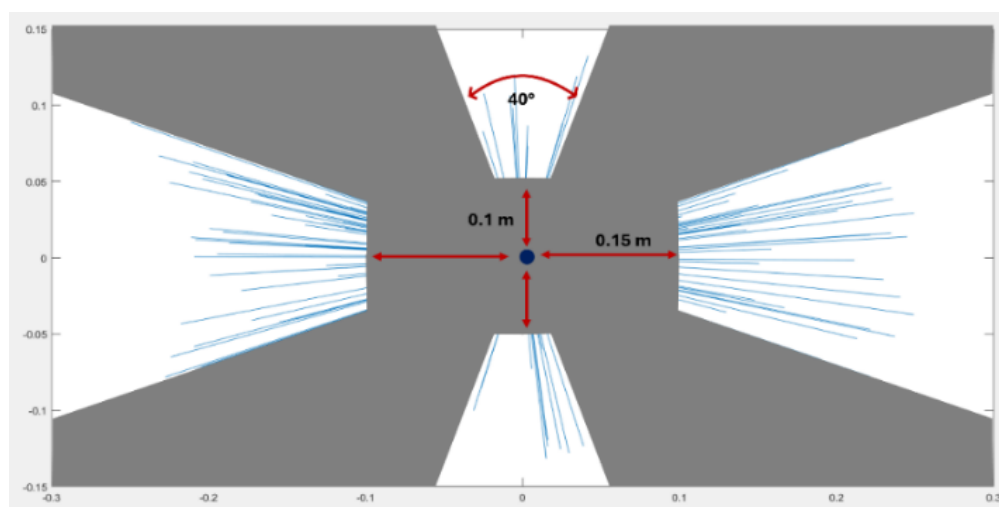
Los términos  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$ ,  $V_3(t)$  y  $V_4(t)$  denotan los potenciales EOG medidos por los electrodos 1, 2, 3 y 4 de la figura 5.

A partir del conjunto de señales que entra a este módulo, se realizó una selección automática de datos útiles para este proyecto, con el objetivo de obtener señales representativas para los

movimientos oculares de nuestro interés, entre los que están los movimientos sacádicos y el movimiento de parpadeo.

El etiquetamiento de las señales de interés se realizó bajo dos criterios: ángulos referentes al punto central y distancia entre el punto central y el punto observado al azar. En la figura 15 se observa un área gris y otra blanca con líneas azules, los movimientos que caen sobre el área gris fueron descartados para delimitar los movimientos sacádicos hacia la derecha, izquierda, arriba y abajo; en la segunda área, se observan las líneas azules que son los recorridos realizados por los ojos durante los experimentos y son los seleccionados para representar los movimientos sacádicos finales de nuestro conjunto de datos.

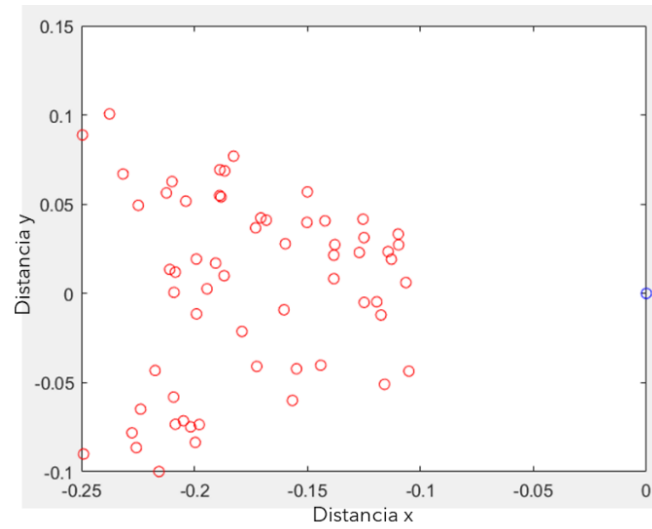
El primer criterio que delimita el área de interés consiste en medir un ángulo de  $40^\circ$  grados:  $20^\circ$  positivos y  $20^\circ$  negativos medidos a partir de los ejes horizontal y vertical como se observa en la figura 15; el segundo criterio consiste en medir una distancia mínima que deben recorrer los ojos durante su movimiento para considerarla relevante, para el eje horizontal fue de 0.15 m y para el eje vertical de 0.1m debido a la forma de la pantalla en la que se basaron los autores de la base de datos de movimientos de EOG que fue de 24in.



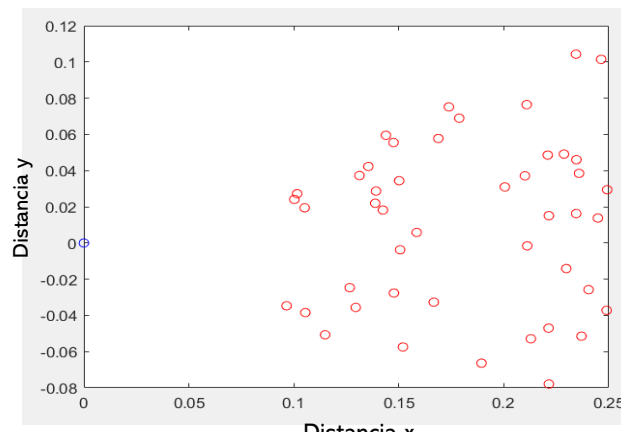
**Figura 15.** Modelo trigonométrico de los ángulos objetivo sobre la pantalla.

Aplicando los criterios descritos, las señales EOG discretas que entraron a este módulo ahora se encuentran etiquetadas según el movimiento ocular que representan obteniendo 546 señales por movimiento y 91 por sujeto.

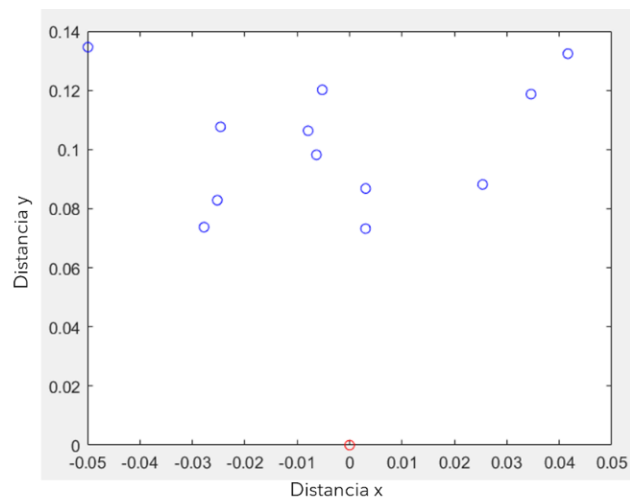
Algunos ejemplos de la selección final de las señales se encuentran en las figuras 16, 17; 18 y 19 en las que podemos observar un punto azul representando el centro de la pantalla y siendo los puntos rojos aquellos que representan el desplazamiento final del movimiento sacádico iniciado desde el punto azul y que además cumplen los criterios de selección de ángulos y distancia.



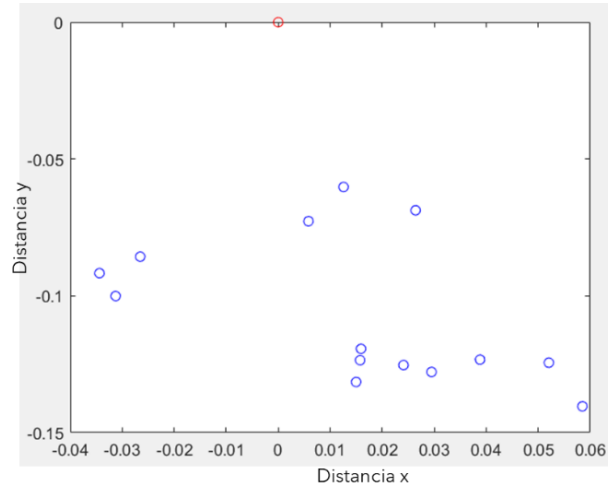
**Figura 16.** Movimiento hacia la izquierda.



**Figura 17.** Movimiento hacia la derecha.



**Figura 18.** Movimiento hacia arriba.



**Figura 19.** Movimiento hacia abajo.

## 4.2. Extracción de características

**Tabla 3.** Características extraídas de las señales EOG.

| Característica            | Fórmula                                                                                                                            | Núm. de ecuación |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Valor absoluto medio      | $MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i $                                                                                             | (1)              |
| Desviación estándar       | $STD = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]$<br>donde:<br>$\bar{x}$ = valor absoluto medio.                 | (2)              |
| Varianza                  | $Var = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2$                                                                                           | (3)              |
| Longitud de forma de onda | $WL = \sum_{i=1}^N  x_i - x_{i-1} $                                                                                                | (4)              |
| Cruce por cero            | $Var = \sum_{i=1}^N sgn(-x_i x_{i-1})$<br>$sgn(x) = \begin{cases} 1; & \text{si } x > 0 \\ 0; & \text{de otra manera} \end{cases}$ | (5)              |
| Energía                   | $E = \left[ \sum_{i=1}^N x_i \right]^2$                                                                                            | (6)              |

Una vez etiquetadas las señales EOG procedemos con la identificación de atributos, las características empleadas en este proyecto son calculadas en función del tiempo y frecuencia y se listan a continuación en la tabla 3 tomando en cuenta la siguiente simbología [10] [11].

$$x_i = \text{señal EOG}$$

$$N = \text{tamaño de la ventana}$$

Con la representación de las señales según sus características, procedemos a formar el conjunto de entrenamiento y pruebas con un total de 365 señales para el primer conjunto y de 90 para el segundo conjunto. Un punto para tener en cuenta en este punto es que según el análisis de características que se le aplique a las señales tendremos una diferente cantidad de atributos para analizar en la siguiente etapa.

### 4.3. Clasificación

Con la representación de señales obtenida durante este módulo se entrenaron los clasificadores anteriormente explicados: red neuronal multicapa (NN por sus siglas en inglés Neural Networks) y la máquina de soporte vectorial (SVM por sus siglas en inglés Support Vector Machine) empleando una validación cruzada de 5 pliegues. En cuanto a las redes neuronales se entrenaron redes bicapa, tricapa, narrow, médium y wide. Para la máquina de soporte vectorial se realizaron pruebas modificando la función kernel entre las siguientes: lineal, gaussiana, cuadrática y cúbica.

A través de la entrada a este módulo con las señales caracterizadas se determina el tipo de señal que entra al sistema domótico, es decir, este módulo es el encargado de determinar si la señal ocular que entra a él es un movimiento sacádico hacia arriba, un movimiento sacádico hacia abajo, un movimiento sacádico a la derecha, un movimiento sacádico a la izquierda o un parpadeo.

### 4.4. Interfaz de control: procesamiento Arduino

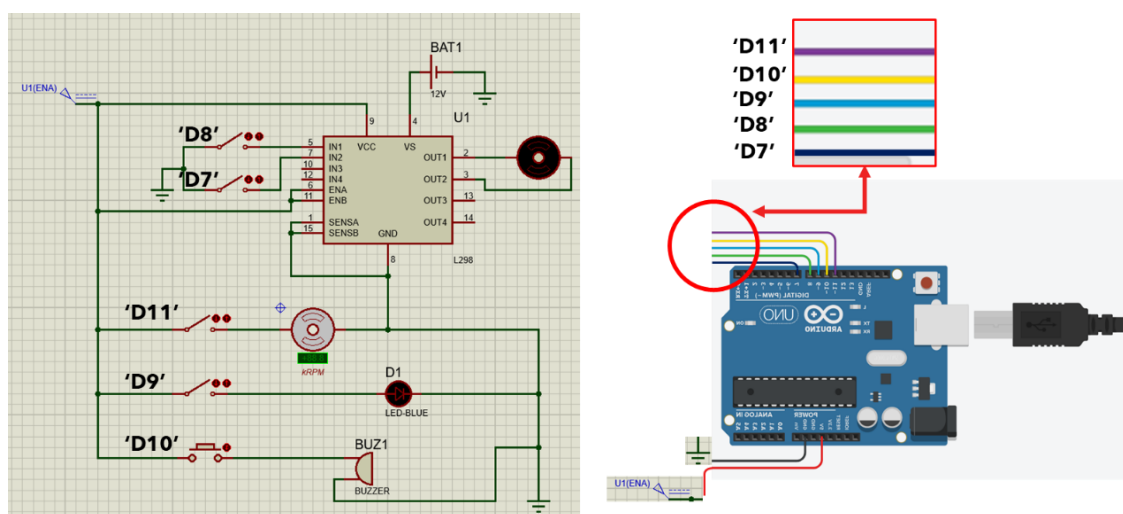
En este módulo se recibe la señal EOG de salida del módulo de clasificación, el cual previamente identifiqué el tipo de movimiento (clase) a la que pertenece la señal ocular y que, por lo tanto, determinará el dispositivo eléctrico que responderá a dicha señal. Tomando en cuenta las necesidades de una persona dentro de una habitación se eligieron los sistemas de la tabla 4 con el objetivo de ofrecer comodidad y seguridad al usuario del sistema.

Además de explicar los sistemas que contiene el prototipo domótico, la tabla 4 contiene la descripción de los elementos eléctricos; en este punto debemos recordar que los componentes se eligieron buscando una equivalencia entre los elementos que se usarían dentro de una habitación de una vivienda.

Finalmente, el circuito eléctrico del sistema domótico con los componentes mencionados anteriormente se observa en la figura 20.

**Tabla 4.** Descripción de componentes eléctricos y sistemas que controlan.

| Componente         | Descripción                                                                                                                    | Función                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Ventilador S10-728 | Dispositivo eléctrico con alimentación de 5V, consumo de 0,8 W, de 9,000 rpm. Con medidas de 5*5*3 cm y peso de 8g.            | Sistema de circulación de aire / climatización |
| LED                | Diodo emisor de luz azul con alimentación de 5V.                                                                               | Sistema de iluminación                         |
| Buzzer ABI-009-RC  | Dispositivo generador de ruido con un rango de operación de 4 – 8 V DC. Sonido de salida a 10 cm de distancia de $\geq 85$ dB. | Alarma                                         |
| Motor DC – R250    | Dispositivo que opera en un rango de voltaje de 1 – 5 V con una velocidad máxima sin carga de 7000 rpm.                        | Apertura y cierre de ventana                   |
| L298N              | Módulo controlador de moteres DC. Consta de un circuito integrado controlador de motor L298 y un regulador 78M05 de 5 V.       |                                                |



**Figura 20.** Simulación de circuito eléctrico de prototipo domótico.

Para implementar una comunicación entre el clasificador y el circuito eléctrico se utilizó el microcontrolador Arduino y el paquete de soporte de Matlab para Arduino que permite

escribir programas de Matlab para leer y escribir datos en el microcontrolador, los comandos enviados a Arduino dependen del tipo de movimiento sacádico identificado por el clasificador, según el comando recibido se enviarán las señales de control adecuadas al circuito eléctrico, como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Relación entre los movimientos oculares y componentes eléctricos.

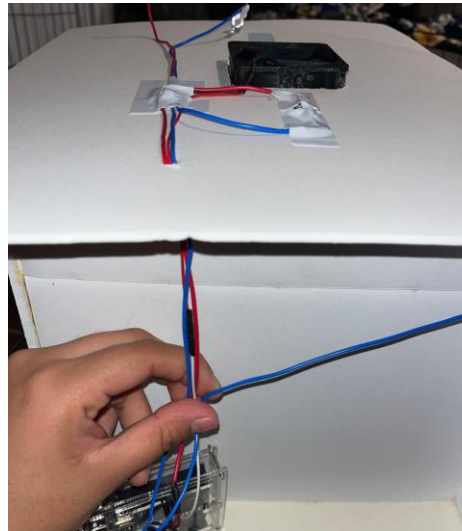
| Movimiento ocular                  | Componente electrico ON/OFF                                                |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Movimiento sacádico a la derecha   | Encendido/apagado del LED                                                  |
| Movimiento sacádico a la izquierda | Encendido/apagado del ventilador                                           |
| Movimiento sacádico hacia arriba   | Movimiento del motor DC en dirección a las manecillas del reloj.           |
| Movimiento sacádico hacia abajo    | Movimiento del motor DC en dirección contraria a las manecillas del reloj. |
| Parpadeo                           | Encendido/apagado de la alarma                                             |

#### 4.5. Construcción de prototipo domótico

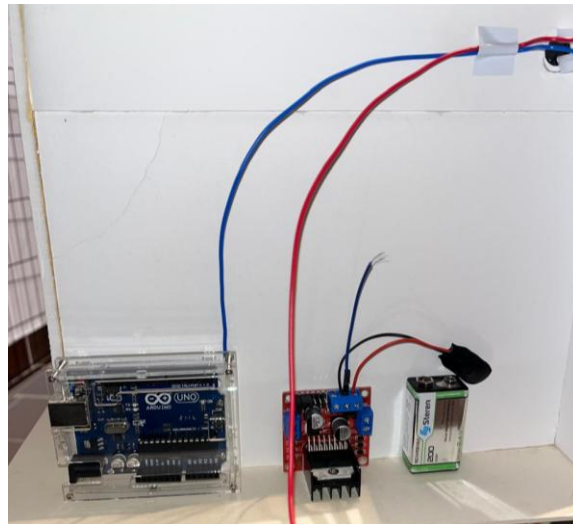
A continuación, se presentan algunas evidencias de la elaboración de la maqueta del prototipo domótico.



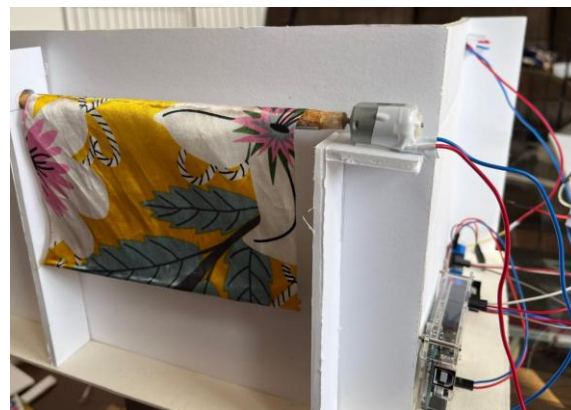
**Figura 21.** Base de maqueta, vista desde la zona representativa de una habitación.



**Figura 22.** Conexiones eléctricas del sistema de iluminación y ventilación.



**Figura 23.** Arduino Uno, modulo controlador L298N y batería de 9V.



**Figura 24.** Sistema de apertura y cierre de ventanas.

## Capítulo 5. Experimentos y resultados

A continuación, se describen los experimentos realizados para la selección del clasificador.

### 5.1. Experimento 1. Caracterización en función del tiempo.

En este experimento la señal se caracterizó con cinco métricas en función del tiempo, las cuales son el valor absoluto medio, desviación estándar, varianza, longitud de forma de onda y cruce por cero definidas en la sección 4.2 de la metodología.

**Tabla 6.** Resultados de clasificación con características de tiempo empleando Redes Neuronales.

| Ventana | Exactitud  |             |          |      |          |      |              |             |               |      |
|---------|------------|-------------|----------|------|----------|------|--------------|-------------|---------------|------|
|         | NN Angosto |             | NN Media |      | NN Ancha |      | NN Bilateral |             | NN Trilateral |      |
|         | Train      | Test        | Train    | Test | Train    | Test | Train        | Test        | Train         | Test |
| 512     | 64.9       | 62.2        | 68.2     | 65.6 | 66.6     | 63.3 | 62.7         | 64.4        | 61.6          | 64.4 |
| 256     | 91.5       | 93.3        | 92.9     | 93.3 | 92.6     | 93.3 | 91.2         | 94.4        | 91.2          | 93.3 |
| 128     | 96.4       | 96.7        | 98.1     | 96.7 | 96.7     | 96.7 | 97.0         | <b>97.8</b> | 95.6          | 96.7 |
| 64      | 96.4       | <b>97.8</b> | 97.5     | 95.6 | 97.3     | 96.7 | 90.4         | 96.7        | 92.9          | 94.4 |

**Tabla 7.** Resultados de clasificación con características de tiempo empleando Máquina de Soporte Vectorial con diferentes kernels.

| Ventana | Exactitud          |             |                     |             |                      |      |
|---------|--------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------|------|
|         | SVM Lineal         |             | SVM Cuadrático      |             | SVM Cúbico           |      |
|         | Train              | Test        | Train               | Test        | Train                | Test |
| 512     | 57.5               | 58.9        | 65.5                | 62.2        | 66.6                 | 64.4 |
| 256     | 93.4               | 94.4        | 93.7                | 92.2        | 92.3                 | 91.1 |
| 128     | 96.4               | <b>97.8</b> | 96.7                | 96.7        | 96.4                 | 95.6 |
| 64      | 95.3               | 93.3        | 96.2                | 92.2        | 94                   | 91.1 |
| Ventana | Exactitud          |             |                     |             |                      |      |
|         | SVM Gaussiano Fino |             | SVM Gaussiano Medio |             | SVM Gaussiano Grueso |      |
|         | Train              | Test        | Train               | Test        | Train                | Test |
| 512     | 61.4               | 61.1        | 57.8                | 57.8        | 50.4                 | 50.4 |
| 256     | 77.8               | 76.7        | 92.6                | 94.4        | 88.8                 | 87.8 |
| 128     | 77.5               | 75.6        | 94.0                | <b>97.8</b> | 91.8                 | 94.4 |
| 64      | 61.1               | 55.6        | 97.5                | 95.6        | 87.1                 | 91.1 |

Para el cálculo de las métricas se realizó la operación de ventaneo con una variación en el tamaño de muestra  $L$  (ventana) de 512, 256, 128 y 64. Posteriormente se realizaron experimentos con los clasificadores mencionados anteriormente NN y SVM. Los mejores resultados están presentes en la tabla 6 y 7 resaltados en negritas y corresponden a las ventanas 128 y 64, sin embargo, como fue mencionado anteriormente se realizaron experimentos con ventana de 512 y 256 pero al resultar menores porcentajes en exactitud no fueron incluidos.

Como puede observarse en las tablas de este experimento los mejores resultados para las NN se obtuvieron con una ventana de 128 con la NN bilateral y 64 con la NN angosta siendo un 97.8% en exactitud para ambas, en el caso de SVM los mejores resultados se obtuvieron con una ventana de 128 con SVM lineal y SVM Gaussiano Medio con un 97.8%.

## 5.2. Experimento 2. Caracterización en función del tiempo y características de una señal.

En este experimento la señal se caracterizó en siete métricas en función del tiempo las cuales son el valor máximo de amplitud de pico y valle, la posición máxima de amplitud de pico y valle, el valor de área bajo la curva, número de cruces por umbral y la varianza, definidas en la sección 4.2 de la metodología

**Tabla 8.** Resultados de clasificación con características de tiempo empleando NN.

| Ventana | Umbral | Exactitud  |      |          |      |          |             |              |      |               |      |
|---------|--------|------------|------|----------|------|----------|-------------|--------------|------|---------------|------|
|         |        | NN Angosto |      | NN Media |      | NN Ancha |             | NN Bilateral |      | NN Trilateral |      |
|         |        | Train      | Test | Train    | Test | Train    | Test        | Train        | Test | Train         | Test |
| 512     | 285    | 71         | 76.7 | 69.9     | 77.8 | 72.1     | 82.2        | 69.3         | 78.9 | 70.1          | 68.9 |
|         | 255    | 72.6       | 72.2 | 72.9     | 82.2 | 74.8     | 78.9        | 72.1         | 73.3 | 68.2          | 72.2 |
|         | 225    | 71.8       | 77.8 | 72.6     | 74.4 | 75.6     | 83.3        | 70.4         | 72.2 | 70.1          | 63.3 |
| 256     | 285    | 87.4       | 88.9 | 85.2     | 88.9 | 88.2     | 90          | 83.8         | 88.9 | 83.3          | 90   |
|         | 255    | 87.9       | 86.7 | 86.6     | 90   | 88.8     | 90          | 80.5         | 84.4 | 83.3          | 86.7 |
|         | 225    | 87.7       | 86.7 | 87.7     | 86.7 | 89.6     | 87.8        | 86.3         | 85.6 | 85.5          | 83.3 |
| 128     | 285    | 91.5       | 92.2 | 94.2     | 93.3 | 94       | 93.3        | 91           | 91.1 | 85.5          | 88.9 |
|         | 255    | 91         | 91.1 | 94.5     | 91.1 | 92.9     | 93.3        | 88.5         | 88.9 | 88.8          | 87.8 |
|         | 225    | 90.7       | 88.9 | 92.3     | 92.2 | 91.5     | <b>94.4</b> | 85.8         | 85.6 | 85.5          | 91.1 |
| 64      | 285    | 85.5       | 86.7 | 87.9     | 80   | 87.4     | 83.3        | 82.5         | 80   | 78.4          | 82.2 |
|         | 255    | 83.6       | 83.3 | 86.6     | 83.3 | 86.3     | 83.3        | 85.5         | 87.8 | 78.9          | 85.6 |
|         | 225    | 84.1       | 78.9 | 86.8     | 83.3 | 88.2     | 82.2        | 82.2         | 82.2 | 79.6          | 74.4 |

**Tabla 9.** Resultados de clasificación con características de tiempo empleando SVM con diferente kernel.

| Ventana | Umbral | Exactitud          |      |                     |             |                      |             |
|---------|--------|--------------------|------|---------------------|-------------|----------------------|-------------|
|         |        | SVM Lineal         |      | SVM Cuadrático      |             | SVM Cúbico           |             |
|         |        | Train              | Test | Train               | Test        | Train                | Test        |
| 512     | 285    | 67.4               | 74.4 | 74.2                | 80          | 74.5                 | 78.7        |
|         | 255    | 69                 | 70   | 72.6                | 77.8        | 73.4                 | 74.4        |
|         | 225    | 70.7               | 67.8 | 72.1                | 82.2        | 72.6                 | 75.6        |
| 256     | 285    | 87.4               | 91.1 | 86.3                | 91.1        | 83.6                 | 88.9        |
|         | 255    | 87.1               | 88.9 | 88.2                | 91.1        | 84.7                 | 87.8        |
|         | 225    | 87.1               | 88.9 | 85.8                | 91.1        | 84.1                 | 87.8        |
| 128     | 285    | 91.8               | 92.2 | 93.4                | 92.2        | 89.6                 | 93.3        |
|         | 255    | 91.8               | 90   | 92.3                | 92.2        | 90.4                 | 92.2        |
|         | 225    | 91.2               | 91.1 | 90.1                | <b>93.3</b> | 90.1                 | <b>93.3</b> |
| 64      | 285    | 85.8               | 82.2 | 85.2                | 81.1        | 84.1                 | 80          |
|         | 255    | 87.1               | 82.2 | 88.5                | 76.7        | 85.5                 | 76.7        |
|         | 225    | 87.4               | 78.9 | 87.1                | 80          | 86                   | 76.7        |
| Ventana | Umbral | Exactitud          |      |                     |             |                      |             |
|         |        | SVM Gaussiano Fino |      | SVM Gaussiano Medio |             | SVM Gaussiano Grueso |             |
|         |        | Train              | Test | Train               | Test        | Train                | Test        |
| 512     | 285    | 57.5               | 57.5 | 69.9                | 69.9        | 60                   | 60          |
|         | 255    | 61.1               | 62.2 | 69.6                | 66.7        | 60.5                 | 60          |
|         | 225    | 58.9               | 62.2 | 67.4                | 72.2        | 59.5                 | 58.9        |
| 256     | 285    | 51.2               | 50   | 86                  | 88.9        | 79.7                 | 80          |
|         | 255    | 51                 | 48.9 | 85.5                | 85.6        | 77.3                 | 81.1        |
|         | 225    | 52.1               | 48.9 | 85.8                | 85.6        | 74.2                 | 81.1        |
| 128     | 285    | 49.9               | 46.7 | 90.1                | 92.2        | 82.5                 | 82.2        |
|         | 255    | 46.8               | 46.7 | 90.1                | 91.1        | 81.4                 | 78.9        |
|         | 225    | 44.9               | 45.6 | 89.6                | 91.1        | 79.7                 | 81.1        |
| 64      | 285    | 40.3               | 44.4 | 84.7                | 84.4        | 65.2                 | 66.7        |
|         | 255    | 38.1               | 43.3 | 85.5                | 83.3        | 69.9                 | 64.4        |
|         | 225    | 39.5               | 43.3 | 82.5                | 84.4        | 66.6                 | 65.6        |

Para calcular las métricas se realizó una operación de ventaneo con una variación en el tamaño de muestra L (ventana) de 512, 256, 128 y 64 y una variación de umbral (umbral) de 285, 255 y 225; valores seleccionados experimentalmente. Posteriormente se realizaron experimentos con los clasificadores previamente mencionados NN y SVM.

Los mejores resultados están presentes en la tabla 8 y 9 resaltados en negritas y corresponden a las ventanas 256 y 128.

Como se observa en las tablas 8 y 9, el mejor resultado se obtuvo con la NN ancha con ventana de 128 y umbral de 225 con una exactitud de 94.4%.

### 5.3. Experimento 3. Caracterización en función del tiempo – frecuencia.

En este experimento la señal se caracterizó con seis métricas en función del tiempo – frecuencia: valor absoluto medio, desviación estándar, varianza, longitud de forma de onda y cruce por cero definidas en la sección 4.2.

Para calcular las métricas se aplicó la transformada wavelet discreta sobre las señales EOG discretas y se tomaron los coeficientes de aproximación sobre los que se realizó la operación de ventaneo con variación del tamaño de muestra L (Ventana) de 64, 32, 16 y 8. Las operaciones se realizaron con las familias daubechies (db2) y symlet (sym2). Posteriormente se realizaron experimentos con NN y SVM.

Los mejores resultados están en las tablas 10 y 11 resaltados en negritas y corresponden a las ventanas 16 y 8.

**Tabla 10.** Resultados de clasificación con características de tiempo – frecuencia empleando NN.

| Ventana | Familia | Exactitud  |             |          |             |          |      |              |      |               |      |
|---------|---------|------------|-------------|----------|-------------|----------|------|--------------|------|---------------|------|
|         |         | NN Angosto |             | NN Media |             | NN Ancha |      | NN Bilateral |      | NN Trilateral |      |
|         |         | Train      | Test        | Train    | Test        | Train    | Test | Train        | Test | Train         | Test |
| 64      | db2'    | 60.5       | 66.7        | 71.2     | 70          | 76.4     | 77,8 | 60           | 70   | 61.1          | 64.4 |
| 32      |         | 69.3       | 66.7        | 73.2     | 70          | 74.2     | 70   | 67.7         | 68.9 | 68.5          | 78.9 |
| 16      |         | 94.5       | <b>96.7</b> | 94.8     | 95.6        | 94.8     | 95,6 | 92.1         | 94.4 | 93.2          | 94.4 |
| 8       |         | 94.5       | 93.3        | 95.3     | 91.1        | 96.2     | 93,3 | 94.5         | 90   | 93.2          | 90   |
| 64      | sym2'   | 59.5       | 66.7        | 68.2     | 65.6        | 70.4     | 76,7 | 67.9         | 70   | 54.5          | 65.6 |
| 32      |         | 71.8       | 71.1        | 72.9     | 75.6        | 68.5     | 70   | 70.1         | 60   | 62.5          | 70   |
| 16      |         | 94.8       | 92.2        | 94       | <b>96.7</b> | 94.8     | 94,4 | 89.6         | 94.4 | 91.8          | 91.1 |
| 8       |         | 94.2       | 93.3        | 97       | 94.4        | 95.9     | 93,3 | 93.7         | 94.4 | 91.2          | 91.1 |

**Tabla 11.** Resultados de clasificación con características de tiempo – frecuencia empleando SVM con diferente kernel.

| Ventana | Familia | Exactitud          |             |                     |             |                      |             |
|---------|---------|--------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------|-------------|
|         |         | SVM Lineal         |             | SVM Cuadrático      |             | SVM Cúbico           |             |
|         |         | Train              | Test        | Train               | Test        | Train                | Test        |
| 64      | db2'    | 43.3               | 46.7        | 58.9                | 64.4        | 61.4                 | 66.7        |
| 32      |         | 61.9               | 65.6        | 71.2                | 65.6        | 72.9                 | 71.1        |
| 16      |         | 94.2               | <b>96.7</b> | 95.6                | <b>96.7</b> | 93.4                 | 95.6        |
| 8       |         | 94.8               | <b>96.7</b> | 93.2                | 94.4        | 94.0                 | <b>96.7</b> |
| 64      | sym2'   | 46.3               | 46.7        | 58.1                | 64.4        | 60.8                 | 66.7        |
| 32      |         | 63.8               | 65.6        | 71.2                | 65.6        | 71.2                 | 71.1        |
| 16      |         | 79.2               | 85.6        | 94.2                | <b>96.7</b> | 80.5                 | 87.8        |
| 8       |         | 95.1               | <b>96.7</b> | 93.4                | 94.4        | 94.2                 | <b>96.7</b> |
| Ventana | Familia | Exactitud          |             |                     |             |                      |             |
|         |         | SVM Gaussiano Fino |             | SVM Gaussiano Medio |             | SVM Gaussiano Grueso |             |
|         |         | Train              | Test        | Train               | Test        | Train                | Test        |
| 64      | db2'    | 54.5               | 58.9        | 37.5                | 44.4        | 34.5                 | 31.1        |
| 32      |         | 65.2               | 66.7        | 61.6                | 64.4        | 52.9                 | 57.8        |
| 16      |         | 79.2               | 85.6        | 94.2                | <b>96.7</b> | 80.5                 | 87.8        |
| 8       |         | 78.1               | 82.2        | 91.5                | 93.3        | 75.3                 | 82.2        |
| 64      | sym2'   | 55.6               | 58.9        | 38.6                | 44.4        | 30.4                 | 31.1        |
| 32      |         | 65.8               | 66.7        | 60.3                | 64.4        | 53.7                 | 57.8        |
| 16      |         | 81.6               | 85.6        | 94.0                | <b>96.7</b> | 82.2                 | 87.8        |
| 8       |         | 78.1               | 82.2        | 93.2                | 93.3        | 75.9                 | 82.2        |

Las tablas 10 y 11 muestran los mejores resultados en la familia db2 con ventana de 16 con exactitud de 96.7% son con la NN angosta, NN media, y SVM con kernel lineal, cuadrático y gaussiano medio; con ventana de 8 se obtuvo la misma exactitud con SVM lineal y cúbico. En cuanto a la familia sym2 se mantuvo la exactitud con una ventana de 16 para la NN media, SVM cuadrático y SVM gaussiano medio, con una ventana de 8 se alcanzó el mismo resultado con el SVM lineal.

Finalmente, los mejores resultados se encuentran en el experimento 1. Con ventana de 128 y los clasificadores NN bilateral, SVM lineal y SVM gaussiano medio con una exactitud de 97.8%. La NN angosta iguala esta exactitud con una ventana de 64.

Con un análisis general de los tres experimentos observamos que las características con mejores resultados son calculadas en función del tiempo en el experimento 1, si tomamos en cuenta los experimentos 1 y 2 (ambos realizados en función del tiempo) observamos que la ventana de 128 es la que tiene porcentajes de exactitud más altos, por ello dicha ventana es seleccionada para emplear junto al clasificador.

Para seleccionar entre la NN bilateral, SVM lineal y SVM gaussiano medio analizaremos el tiempo de entrenamiento, la velocidad de predicción y el tamaño del modelo, datos encontrados en la tabla 12.

**Tabla 12.** Comparación de clasificadores con mejores resultados de exactitud.

| Clasificador        | Tiempo de entrenamiento (seg) | Velocidad de predicción (obs/seg) | Tamaño del modelo compacto (kB) |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| NN Bilateral        | 1.4202                        | 12000                             | 15                              |
| SVM Lineal          | 4.3384                        | 3500                              | 102                             |
| SVM gaussiano medio | 3.8164                        | 3300                              | 305                             |

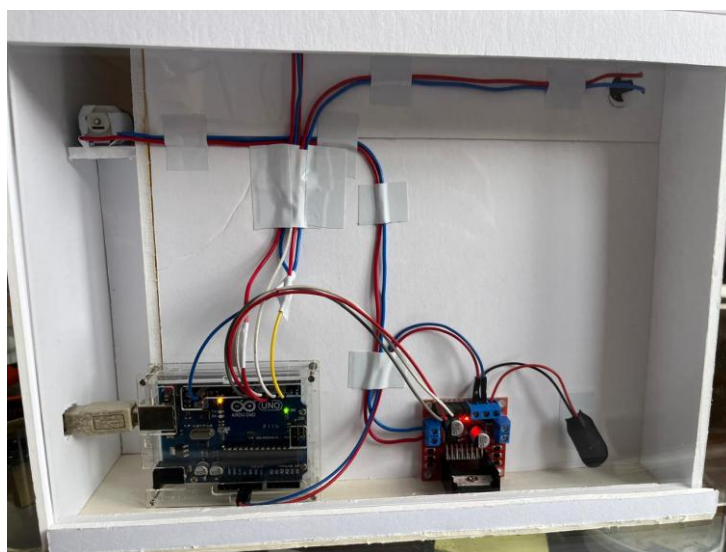
La velocidad de predicción se refiere al número de observaciones procesadas por segundo, con esto en mente el clasificador con mayor velocidad de predicción es la NN bilateral. Un factor importante además de la velocidad de predicción es el tamaño del modelo ya que este proyecto tiene como objetivo implementar una conexión software – hardware para la construcción de un prototipo domótico la cantidad de memoria que ocupe el modelo definirá las especificaciones del dispositivo computacional necesario para su funcionamiento, ante estas consideraciones, se seleccionó el clasificador de rede neuronal bilateral (NN bilateral) para la construcción del prototipo domótico.

#### 5.4. Producto Final

A continuación, se presentan las imágenes del prototipo domótico final.



**Figura 25.** Prototipo domótico, vista desde la zona representativa de una habitación.



**Figura 26.** Prototipo domótico, vista de circuito eléctrico.

## Capítulo 6. Conclusión y trabajo a futuro

Finalmente, durante este capítulo se presenta una conclusión del trabajo desarrollado y remarcando partes importantes del mismo; así como también la exposición del trabajo a futuro que se plantea para su expansión.

### 6.1. Conclusión

La arquitectura para la construcción de un prototipo domótico controlado por señales EOG se mostró efectiva con los módulos de etiquetamiento de señales, extracción de características y clasificación proporcionando buenos resultados en la identificación de señales oculares: movimientos sacádicos hacia la derecha, izquierda, arriba, abajo y parpadeo.

Usar características en tiempo para las señales EOG discretas generó resultados más exactos. En el proceso de clasificación se comprobó la efectividad de SVM en señales biológicas como plantearon trabajos anteriores. Las NN mostraron también una clasificación de señales aceptable. Ambos clasificadores obtuvieron una exactitud de 97.8% no obstante, se observan diferencias en velocidad de predicción (mayor con NN) y tamaño de los modelos en cuanto a espacio en disco (menor con NN) observable en la tabla 12, por ello en esta investigación, el clasificador seleccionado fue la red neuronal bilateral con dos capas conectadas internamente con 10 neuronas.

Posteriormente, en la implementación del circuito eléctrico se logró una comunicación efectiva con el clasificador resultando en un prototipo domótico controlado por señales de electrooculografía completamente funcional.

### 6.2. Trabajo a futuro

El proyecto se mostró viable para extrapolarlo a un ambiente real, refiriéndonos a una habitación cuyas características eléctricas son diferentes debido al tipo de corriente que se maneja (alterna) y la empleada hasta el momento en el prototipo domótico (directa). Con este objetivo podemos observar la funcionalidad de este proyecto.

Además de lo plateado anteriormente que resulta prometedor para la aplicación de este trabajo, el mismo presenta limitantes en cuanto a la cantidad de dispositivos eléctricos que pueden ser controlados con las señales de electrooculografía propuestas actualmente, documentando una base de datos mayor con diferentes tipos de movimiento entre los que podemos incluir movimientos en diagonales o la combinación de los mismos podemos ampliar la complejidad del trabajo y con ello pensar en controlar una mayor cantidad de elementos eléctricos con esta metodología.

## Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud, «Organización Mundial de la Salud,» 7 03 2023. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>. [Último acceso: 09 2024].
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «La discapacidad en México, datos al 2014: versión 2017 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía,» La discapacidad en México, pp. 21-28, 2017.
- [3] Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. (2017). Anatomía con orientación clínica. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer.
- [4] Brito, X. G. (2013, enero). Universidad Politécnica Salesiana. Diseño y construcción de sistema de control por computador mediante señales electro-oculográficas para personas con discapacidad motriz.
- [5] Rojas, D. C. (2008). Control de mouse a través de señales EOG y algoritmos de boosting. Ingeniería Electrónica. Bogotá: Ingeniería electrónica.
- [6] B. Nathaniel, C. Tracey A. y C. Kenneth P. «A comparison of EOG baseline drift mitigation techniques» Elsevier, vol. LVIII, p. 9, 2019.
- [7] Barea Navarro, Rafael Interfaz Usuario – Máquina basado en electrooculografía. Aplicación a la movilidad. Universidad de Alcalá. Madrid. España: s.n., 2001. Tesis Doctoral. Disponible en: <http://www.depeca.uah.es/personal/basea/tesis.htm>
- [8] Rojas, D. C. (2008). Control de mouse a través de señales EOG y algoritmos de boosting. Ingeniería Electrónica. Bogotá: Ingeniería electrónica.
- [9] D. G. Manolakis y J. G. Proakis, Tratamiento digital de señales, Madrid: Pearson Educación S.A., 2007.
- [10] Abbaspour, S., Lindén, M., Gholamhosseini, H., Naber, A., & Ortiz-Catalan, M. (2020). Evaluation of surface EMG-based recognition algorithms for decoding hand movements. Medical & Biological Engineering & Computing, 1-18.
- [11] Aungsakul, S., Phinyomark, A., Phukpattaranont, P., & Limsakul, C. (2012). Evaluating Feature Extraction Methods of Electrooculography (EOG) Signal for Human-Computer Interface. ELSEVIER.
- [12] Tang, Y. Y. (2009). Wavelet Theory Approach to Pattern Recognition. Hong Kong: World Scientific. doi: <https://doi.org/10.1142/7324>
- [13] Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). Acervo para el mejoramiento del aprendizaje de alumnos de ingeniería, en inteligencia artificial. Retrieved 2024, from UNAM Cuautitlan: [https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/?page\\_id=1108](https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/?page_id=1108)
- [14] The MathWorks, Inc. (2025, Marzo 21). Mathworks. Retrieved from Choose Classifier Options.
- [15] Tablada, C. J., & Torres, G.A. (s. f.). Redes neuronales artificiales. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8832469.pdf>
- [16] Brito, X. G. (2013, enero). Universidad Politécnica Salesiana. Diseño y construcción de sistema de control por computador mediante señales electro-oculográficas para personas con discapacidad motriz.
- [17] López, A., Fernández, M., Rodríguez, H., Ferrero, F., & Postolache, O. (2018). Development of an EOG-based system to control a serious game. ELSEVIER, 1-8.

- [18] Tuay, D. F., & Quijada, G. (2019). Sistema de transmisión de datos electrooculográficos por medio de tecnología inalámbrica basado en CS y técnicas avanzadas de procesamiento para el desplazamiento de un vehículo. Revista digital de Semilleros de Investigación REDSI.
- [19] Bulling, A., Ward, J., Gellersen, H., & Tröster, G. (2011). Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography. IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE.
- [20] N. Barbara, T. A. Camilleri y K. P. Camilleri, «L-Universita ta' Malta,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.um.edu.mt/cbc/ourprojects/eyecon/eogdataset/>. [Último acceso: 09 2024].
- [21] B. Nathaniel, C. Tracey A. y C. Kenneth P. «A comparison of EOG baseline drift mitigation techniques» Elsevier, vol. LVIII, p. 9, 2019.