



UNIVERSIDAD DE MENDOZA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE BIOINGENIERÍA

---

Dispositivo indicador de consumo de  
drogas psicoactivas basado en  
pupilografía

---

TRABAJO FINAL

**Alumno:** Agustín Nahuel QUIROGA BAIGORRÍ

**Director:** Bioing. Gabriel QUINTERO

**Asesores:** Bioing. Silvina MOYANO

Mtr. Med. Aldo S. SARACCO

Med. Danilo MIHALICH

Med. Carlos H. GORDILLO

Nicolas RALO

Año 2022



## **Agradecimientos**

A mis padres Betina y Gastón, a mis hermanos Martina e Ignacio por haber hecho todo lo que se encontraba a su disposición para que pueda estudiar y finalizar esta carrera. Por acompañarme en todo este camino y por apoyarme en cada momento difícil que me tocó pasar.

A mi novia Julieta, solo ella sabe por todo lo que tuve que pasar en este proceso, por sostenerme cuando más lo necesitaba y ayudarme a encontrar las fuerzas para seguir adelante.

A mis amigos y amigas, los cuales fueron parte fundamental, festejando conmigo los triunfos y alentándome en las derrotas. Sobre todo, a Nicolás con quien compartimos grandes momentos a lo largo de la carrera.

A cada uno que integra el Instituto de Bioingeniería y sobre todo al grupo de investigación PyBiLayers, quienes hace 5 años abrieron sus puertas y compartieron sus conocimientos conmigo e incentivaron mis curiosidades e inquietudes.

A los profesores que me acompañaron en este camino, sobre todo a Silvina, Hugo y Gabriel quienes me iluminaron con sus conocimientos y experiencia y abrieron mis ojos con respecto a la profesión, la ciencia, y la vida.

Y finalmente a todas las personas que fueron parte de este trabajo final, desde tutores hasta sujetos de prueba, que brindaron su tiempo y conocimientos en función de la realización de este trabajo.



## Resumen

De acuerdo con un relevamiento realizado por la Asociación Civil Luchemos por la Vida,<sup>1</sup> en el año 2019 en Argentina las muertes derivadas de siniestros viales representaron la primera causa de muerte en personas menores de 35 años y la tercera sobre la totalidad de la población. Con respecto a las causas que originan estos accidentes podemos encontrar el consumo de sustancias psicoactivas. Una forma de desincentivar el consumo de sustancias a la hora conducir son los controles de tránsito, en la actualidad se realizan test de narcolemia a los conductores, los cuales consisten en dispositivos que indican el consumo de sustancias como: alcohol, cannabis, cocaína, opiáceos, anfetaminas, metanfetamina y benzodiacepinas. Algunos de los problemas que poseen estos test son: el alto costo y que no indican el tiempo transcurrido desde el consumo de la sustancia. Por este motivo este trabajo consiste en el diseño, desarrollo e impresión de un dispositivo que indique la presencia de sustancias psicoactivas en las horas previas mediante un método rápido, no invasivo y con un costo significativamente menor. El método utilizado fue la pupilografía, y los parámetros evaluados son el tiempo de respuesta, tiempo desde el comienzo de la constricción del iris hasta el punto de máxima excursión, y la amplitud relativa, relación entre la amplitud absoluta y el diámetro inicial. Los principales componentes utilizados son un microcontrolador Raspberry Pi 4 Model B y su módulo de cámara NoIR Raspberry Pi versión 2.1. montados en un casco impreso con tecnología 3D, con respecto al software se desarrolló en Python 3. El dispositivo se puso a prueba con cinco personas bajo el efecto de T.H.C. y cinco bajo el efecto del alcohol debido a que son sustancias utilizadas ampliamente para uso recreativo.

**Palabras claves:** Pupilografía ; Siniestros viales ; Narcolemia; Alcohol ; Tetrahidrocannabinol ; Python 3 ; Raspberry Pi 4 ;



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Anatomía y fisiología ocular . . . . .	3
2.2. Anatomía del sistema nervioso central . . . . .	5
2.2.1. Vía óptica . . . . .	5
2.3. Fisiología del alcohol y tetrahidrocannabinol . . . . .	8
2.3.1. Fisiología del alcohol . . . . .	8
2.3.2. Fisiología del tetrahidrocannabinol . . . . .	9
<b>3. Estado del arte</b>	<b>11</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>13</b>
4.1. Objetivos generales . . . . .	13
4.2. Objetivos específicos . . . . .	13
<b>5. Herramientas y métodos</b>	<b>15</b>
<b>6. Desarrollo de Ingeniería</b>	<b>17</b>
6.1. Dispositivo provisorio . . . . .	17
6.2. Software . . . . .	21
6.2.1. Ventana Principal . . . . .	21
6.2.2. Posicionamiento . . . . .	22
6.2.3. Nuevo Test . . . . .	23
6.2.4. Procesamiento de Imágenes . . . . .	25
6.2.5. Extracción de Parámetros . . . . .	28
6.2.6. Filtrado . . . . .	31
6.2.7. Parámetros . . . . .	32
6.2.8. Proceso de Detección . . . . .	32
6.2.9. Ventana Resultados . . . . .	35

6.3. Pantalla y batería . . . . .	37
6.4. Dispositivo definitivo . . . . .	37
<b>7. Análisis económico</b>	<b>45</b>
7.1. Hardware . . . . .	45
7.2. Software . . . . .	47
7.3. Pruebas en sujetos . . . . .	47
<b>8. Resultados</b>	<b>49</b>
8.1. Tetrahidrocannabinol . . . . .	49
8.2. Alcohol . . . . .	52
<b>9. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>10. Discusión y trabajo futuro</b>	<b>59</b>
<b>Apéndices</b>	<b>61</b>
<b>A. Material suplementario</b>	<b>63</b>
A.1. Manual Alcoholímetro . . . . .	63
<b>Referencias</b>	<b>64</b>
Referencias . . . . .	64







# 1. Introducción

Conforme a un relevamiento realizado por la Asociación Civil Luchemos por la Vida,<sup>1</sup> en el año 2019 en Argentina se produjeron 6.627 muertes derivadas de siniestros viales, lo que representa la primera causa de muerte en personas menores de 35 años y la tercera con respecto a la totalidad de la población. El origen de estos accidentes se debe en 89,5 % a una actitud negligente, una distracción o la propia impericia de los conductores según un informe del Centro de Experimentación de Seguridad Vial de Argentina.<sup>2</sup> Uno de los motivos por los cuales las personas cometen errores al conducir se encuentra en el informe sobre consumo de sustancias psicoactivas en siniestrados viales, llevado a cabo por el Observatorio Nacional Vial,<sup>3</sup> que indica que el 28 % de los conductores que sufrieron algún siniestro vial declararon haber consumido alguna sustancia psicoactiva seis horas antes. Estos estudios denotan la gravedad de la temática que es motivación principal de este trabajo.

Una forma de desincentivar el consumo de sustancias a la hora de manejar es mediante los controles de tránsito, en la actualidad se realizan test de narcolepmia a los conductores, mediante dispositivos indicadores de consumo de sustancias como alcohol, cannabis, cocaína, opiáceos, anfetaminas, metanfetamina y benzodiacepinas. Algunos de los problemas que poseen estos test son el alto costo y que no indican el tiempo transcurrido desde que se consumió la sustancia. Por este motivo se realizó un dispositivo que indique la presencia de sustancias psicoactivas en las horas previas, mediante un método rápido, no invasivo y con un costo significativamente menor. Se optó por la pupilografía debido a que es un elemento valioso para el estudio del sistema nervioso autónomo y sus alteraciones. Los parámetros que se evaluaron son el tiempo de respuesta, tiempo desde el comienzo de la constricción del iris hasta el punto de máxima excursión, y la amplitud relativa, relación entre la amplitud absoluta y el diámetro inicial. Dichos parámetros muestran cambios significativos en personas bajo los efectos de drogas como opioides, benzodiacepinas, tetrahidrocannabinol (T.H.C.) y cocaína que actúan sobre el sistema nervioso central (S.N.C.) como lo indican los resultados plasmados en los estudios científicos *“Pupil function as an indicator for being under the influence of central nervous system-acting substances from a traffic-medicine perspective”*<sup>4</sup> y *“The potential of infrared pupillography in routine police traffic checks”*.<sup>5</sup>



## 2. Marco Teórico

En esta sección se realizará la descripción de las características tanto anatómicas como fisiológicas del sistema visual humano y del sistema nervioso central al igual que la interacción de estos sistemas con drogas psicoactivas depresoras del S.N.C. como el alcohol y el tetrahidrocannabinol.

### 2.1. Anatomía y fisiología ocular

Como se observa en la Figura 2.1 el globo ocular consta de una capa externa constituida por esclera y córnea, luego nos encontramos con la capa intermedia denominada úvea, la cual está compuesta por el cuerpo ciliar y el iris en su cara anterior y coroides en su cara posterior.

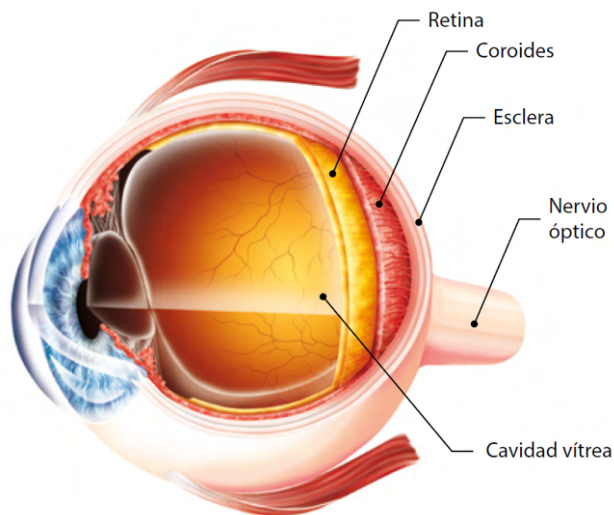


Figura 2.1: Anatomía del globo ocular.

*Extraído de la referencia<sup>6</sup>*

Por último nos encontramos con la capa interna, llamada retina, en la Figura 2.2 se encuentra detallada su topografía. De esta cabe destacar: la retina periférica, área donde

predominan los bastones, y la retina central, en cuyo centro se encuentra la mácula y que a su vez en su núcleo se halla la fovea, zona de mayor agudeza visual debido a que en ella solo hay conos.

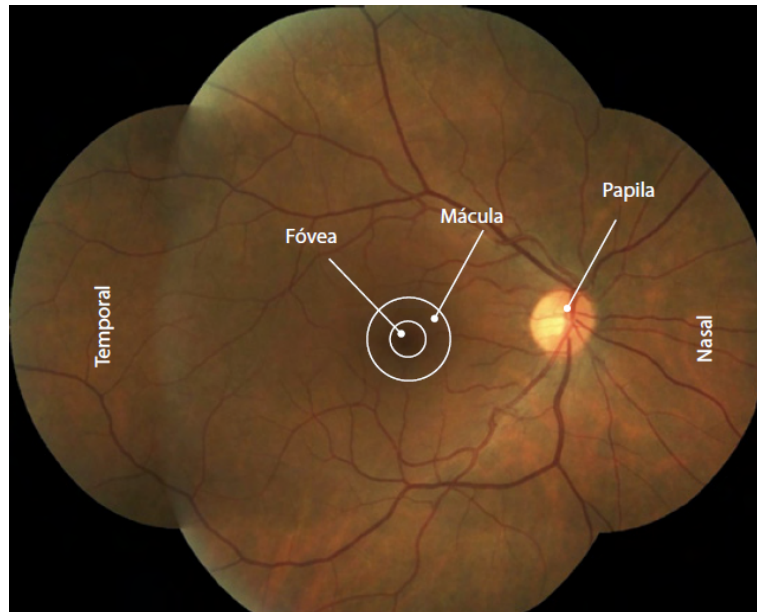


Figura 2.2: Topografía de una retina sana de ojo derecho.

*Extraído de la referencia<sup>6</sup>*

Con respecto a la composición de la retina, en la Figura 2.3 se advierten las distintas capas internas de ella. Es preciso resaltar los siguientes elementos:

- Segmentos externos de los fotorreceptores: solo posee de dos tipos, conos, los cuales son responsables de la visión discriminativa y del color; y bastones, que tienen la función de distinguir entre la luz y la oscuridad.
- Membrana limitante externa: extremos externos de las células de Müller, quienes son las encargadas de dar sostén.
- Granulosa externa: donde se ubican los núcleos de los fotorreceptores.
- Plexiforme externa: aquí se realiza la sinapsis entre células bipolares y fotorreceptores.
- Granulosa interna: núcleos de las células bipolares.
- Plexiforme interna: en esta capa se realiza la sinapsis entre células bipolares y ganglionares y de las células amacrinas con ambas.
- Capa de células ganglionares: núcleos de dichas células.

- Fibras del nervio óptico: los axones de las células ganglionares conformarán el mencionado nervio.

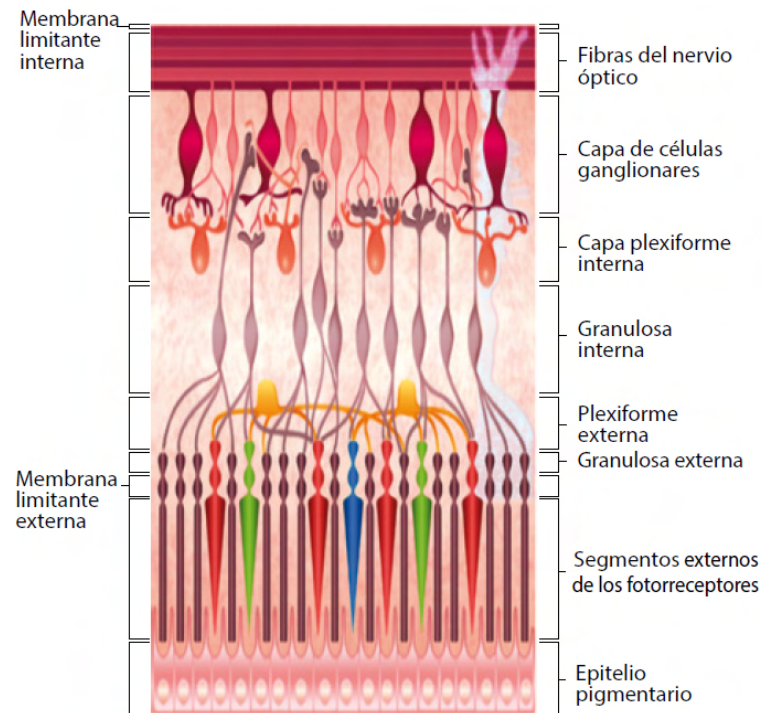


Figura 2.3: Anatomía de la retina.  
 Extraído de la referencia<sup>6</sup>

## 2.2. Anatomía del sistema nervioso central

### 2.2.1. Vía óptica

En la Figura 2.4 se despliegan las principales vías visuales que van desde las dos retinas hasta la corteza visual. Las señales nerviosas abandonan la retina a través de los nervios ópticos. En el quiasma óptico las fibras procedentes de la mitad nasal de la retina cruzan hacia el borde contrario adonde se unen a las fibras originadas en la retina temporal contraria para formar los tractos ópticos o cintillas ópticas. Luego las fibras de cada tracto óptico hacen sinapsis en el núcleo geniculado lateral dorsal del tálamo, y desde ahí, las fibras geniculocalcarinas se dirigen a través de la radiación óptica hacia la corteza visual primaria en la zona pertinente a la cisura calcarina del lóbulo occipital medial.

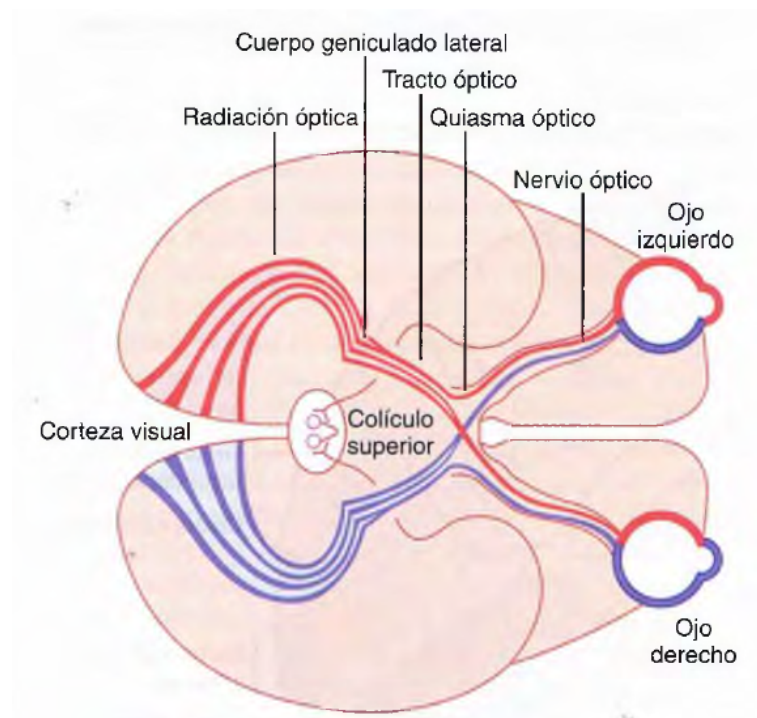


Figura 2.4: Principales vías visuales desde los ojos hasta la corteza visual.

*Extraído de la referencia<sup>7</sup>*

De esta manera, las vías visuales pueden dividirse a grandes rasgos en un sistema antiguo dirigido hacia el mesencéfalo y al cimiento del prosencéfalo y un sistema nuevo para la transmisión directa de las señales visuales hacia la corteza visual situada en los lóbulos occipitales. En el ser humano el método nuevo es el encargado de percibir prácticamente todos los aspectos de la forma visual, los colores y el resto de la visión consciente.

El ojo está innervado por fibras nerviosas simpáticas y parasimpáticas, tal como se puede advertir en la Figura 2.5. Las fibras preganglionares parasimpáticas nacen en el núcleo de Edinger-Westphal y a continuación viajan hasta el ganglio ciliar, que se halla justo detrás del ojo. En este punto, los axones preganglionares hacen sinapsis con las neuronas parasimpáticas posganglionares, que a su vez envían sus fibras hacia el globo ocular a través de los nervios ciliares. Estos nervios excitan el músculo ciliar que controla el enfoque del cristalino y el esfínter del iris que contrae la pupila.

La innervación simpática del ojo inicia en las células del asta intermediolateral a nivel del primer segmento torácico de la médula espinal. Desde ahí, las fibras simpáticas penetran en la cadena simpática y ascienden hacia el ganglio cervical superior, donde realizan su sinapsis con las neuronas posganglionares. Las fibras simpáticas posganglionares siguen a continuación a lo largo de la superficie de la arteria carótida y de otras arterias cada vez



más pequeñas hasta que llegan al ojo. En esta estructura, inervan las fibras radiales del iris, las cuales se encargan de la apertura pupilar, así como varios músculos extraoculares.

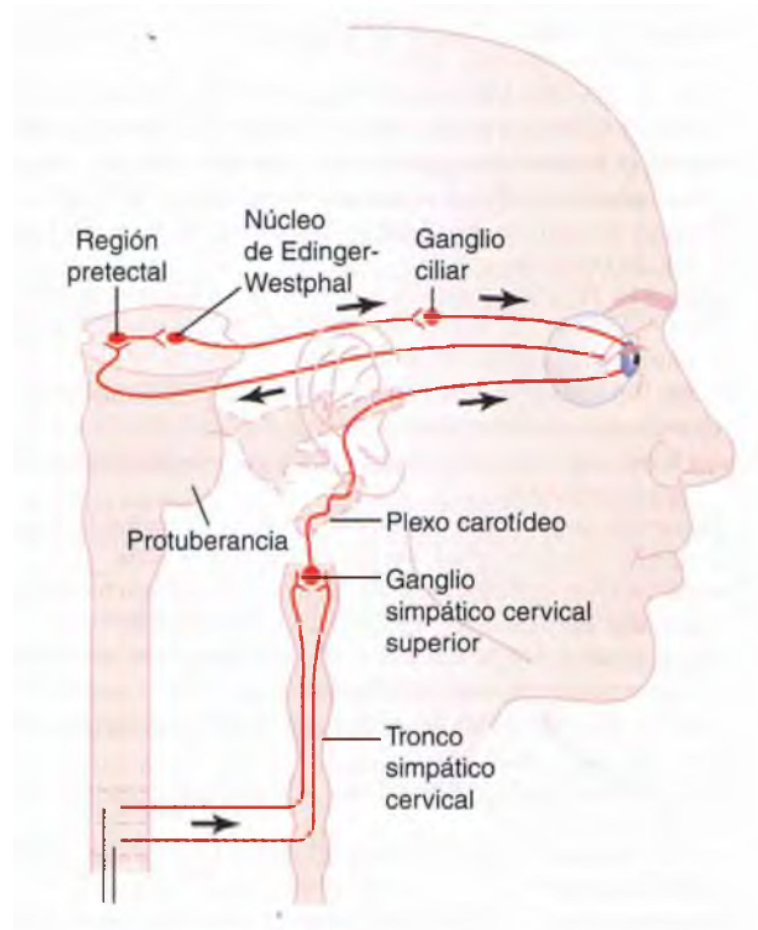


Figura 2.5: Inervación autónoma del ojo, que muestra también el arco del reflejo fotomotor.

*Extraído de la referencia<sup>7</sup>*

### Control del diámetro pupilar

La estimulación de los nervios parasimpáticos también excita el músculo esfínter de la pupila, lo que disminuye por esta vía la apertura pupilar; esto se denomina miosis. A la inversa, la estimulación de los nervios simpáticos excita las fibras radiales del iris y provoca la dilatación pupilar, lo que se llama midriasis.

Cuando la luz ilumina los ojos, las pupilas se contraen, reacción llamada reflejo pupilar fotomotor. La vía neuronal responsable de este reflejo se puede apreciar en la Figura 2.5 con flechas grises. Cuando la luz incide sobre la retina, parte de las señales activadas se dirigen desde los nervios ópticos hasta los núcleos pretectales. Desde estos, los impulsos

secundarios llegan hasta el núcleo de Edinger-Westphal y, finalmente, vuelven por los nervios parasimpáticos para contraer el esfínter del iris. A la inversa, en un ambiente oscuro el reflejo queda inhibido, lo que se traduce en una dilatación de la pupila. La función de este reflejo es la de adaptar el ojo de forma rápida condiciones lumínicas cambiantes. El diámetro pupilar tiene límites en torno a 1,5 mm en su extremo inferior y de 8 mm en el superior. Por lo que, la adaptación a la luz y a la oscuridad que puede alcanzarse mediante el reflejo pupilar es aproximadamente de 30 a 1, es decir, la cantidad de luz que ingresa en el ojo cambia hasta 30 veces.

## 2.3. Fisiología del alcohol y tetrahidrocannabinol

### 2.3.1. Fisiología del alcohol

Solo hay dos tipos de acciones que una sustancia química puede producir sobre las células nerviosas: efectos excitatorios o inhibitorios. Lo que indica que una droga puede aumentar o disminuir la probabilidad de que una célula se active y se comunique con otras células con las que está conectada.

El alcohol, generalmente, deprime este tipo de comunicación, razón por la cual sus acciones son similares a las de otros sedantes, como los barbitúricos, las benzodiacepinas y opioides. A pesar de esto, muchos consumidores comunican que el alcohol los activa inmediatamente después de beber. Como explican Kuhn, Swartzwelder y Wilson esto existe debido a dos mecanismos:

la acción bifásica del alcohol que se refiere al hecho de que una concentración baja de alcohol efectivamente activa algunas células nerviosas. A medida que la concentración de alcohol aumenta, las mismas células disminuyen sus tasas de disparo y la actividad se reprime. el otro mecanismo se debe a que algunas células nerviosas manden señales excitatorias a otras células con las que se comunican, incitándolas a enviar mensajes inhibitorios y suprimiendo la actividad de la próxima célula en el circuito. Por lo tanto, si el alcohol reprime la actividad de una de estas células «inhibitorias», el efecto en el circuito será de activación.

(Kuhn *et al.*)

El alcohol tiene efectos específicos e intensos en la función de al menos dos tipos de receptores neuronales: los receptores *GABA* y el *glutamato*. Estos son neurotransmisores químicos que se encargan de la gran parte de la actividad inhibitoria y excitativa del cerebro. Cuando los terminales de una célula liberan *GABA* los receptores de la siguiente célula, esta se vuelve menos activa. Cuando el *glutamato* cae sobre un receptor, la célula se vuelve más activa.

El alcohol incrementa la actividad inhibitoria de los receptores *GABA* y disminuye la actividad excitativa de los receptores *glucamato*. El aumento de la actividad *GABA* produce buena parte de los efectos sedantes del alcohol, la supresión de la actividad *glucamato* puede tener un efecto más específico: incapacidad de formar nuevos recuerdos o de pensar de manera compleja mientras se está intoxicado.

La dopamina es el principal mensajero químico en los centros de gratificación del cerebro que promueven la experiencia de placer. La ingesta de alcohol aumenta la liberación de dopamina en estos centros mediante la acción de neuronas *GABA* que se conectan con las neuronas dopamina.

Los bebedores crónicos también desarrollan dificultades para centrar su atención y permanecer concentrados cuando se trata de tareas que requieren atención visual y concentración. Nuevamente, el déficit puede no aparecer hasta que la persona se ponga a prueba, como la lectura de un manual de instrucciones, conducir un vehículo o poner en marcha un equipo puede verse impedido.

Con el transcurso del tiempo se produce una tolerancia, después de un consumo continuado de cantidades idénticas de alcohol se produce un efecto menor, es decir se necesita más alcohol para producir el efecto inicial. El desarrollo de tolerancia indica que la exposición al alcohol ha cambiado el cerebro.

### **2.3.2. Fisiología del tetrahidrocannabinol**

Los cannabinoides en el cerebro intervienen en numerosas funciones como el aprendizaje, el control de la ansiedad, etc. Dos áreas del cerebro particularmente ricas en receptores de cannabinoides son el cerebelo y los ganglios basales. Estas áreas ayudan a coordinar y regular nuestros movimientos, la marihuana interrumpe estas funciones.

La marihuana perjudica la capacidad de conducción, la disminución de atención y concentración que produce la marihuana hace que manejar cualquier tipo de maquinaria pesada sea muy peligroso. Los cambios en la percepción y en el sentido de tiempo inducidos por la marihuana pueden ser mortales en la vía. Lo mejor es no conducir nunca cuando se está bajo los efectos de las drogas (legales, ilegales o recetadas), que, como bien se sabe, pueden alterar las funciones motoras y cognitivas.



### 3. Estado del arte

En el mercado se encuentran distintos tipos de test de drogas psicoactivas:

- Test de orina: mediante unas tiras reactivas se puede saber si el individuo consumió drogas en el transcurso de las 24 a 48 horas previas a la toma de la muestra.<sup>9</sup>
- Análisis de sangre: Se obtiene una muestra de sangre y se analiza en busca del estupefaciente.<sup>10</sup>
- Detector de drogas en saliva: el sistema consta de un analizador de saliva y los kits de prueba con los cuales se recogen muestras de saliva las cuales son analizadas dando resultados en un tiempo no máximo a 10 minutos.<sup>11</sup>

Con respecto a dispositivos detectores de alcohol específicamente podemos destacar los siguientes los cuales funcionan a través del sensado del aire espirado de la persona:

- Dräger Alcotest® 5000: es un alcoholímetro profesional que detecta la presencia de alcohol. En caso de que el resultado sea positivo, el nivel exacto de alcohol en sangre se debe determinar, usando dispositivos de prueba de muestreo.<sup>12</sup>
- Dräger Alcotest® 7510: es un alcoholímetro profesional que detecta la presencia de alcohol especialmente diseñado para aplicaciones de análisis avanzadas, puede emplearse como evidencia legal en muchos países. Posee una alta capacidad de memoria y la opción de transferencia de datos inalámbrica. A través del sensor de la presión atmosférica, el dispositivo es capaz de compensar automáticamente las condiciones barométricas ambientales cuando se realizan pruebas de gas seco. El módulo GPS reconoce la ubicación geográfica exacta en la que se realiza la prueba de alcoholemia.<sup>13</sup>
- Lifeloc Technologies alcoholímetro FC20: incluye pruebas automáticas y manuales, una memoria para 4000 pruebas, capacidad de impresión y una interfaz que se utiliza desde una computadora. Posee un rango de detección de 0 a .600 BAC – .00 a 2.85 mg/l, exactitud de  $\pm .005$  BAC a .100 BAC.  $\pm 5\%$  por encima de .100 a .400 BAC, su tiempo de respuesta es inmediato para pruebas negativas y menos de 10 segundos para

pruebas positivas, mientras que su tiempo de recuperación es inmediato para pruebas negativas y menos de 30 segundos para pruebas positivas.<sup>14</sup>

En relación a equipos de pupilografía en el mercado se pueden encontrar los siguientes:

- AMTech F<sup>2</sup>D Fit-For-Duty: es un dispositivo fácil de operar, no invasivo y rápido para obtener una evaluación objetiva de la activación del S.N.C. y la vigilancia relacionada con las drogas.<sup>15</sup>

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivos generales

- Desarrollar un sistema capaz de sensar la dinámica pupilar del sujeto y contrastar con valores normales para inferir consumo de drogas psicoactivas.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e imprimir un modelo 3D del dispositivo que integre hardware y brinde condiciones de oscuridad.
- Coordinar estímulos lumínicos con la obtención de imágenes.
- Procesar las imágenes.
- Medir tiempo de respuesta y amplitud relativa de la pupila.
- Comparar parámetros sensados con valores correspondientes a grupo de control en base a estudios científicos.
- Integrar una pantalla en el dispositivo y presentar resultados en este.
- Evaluar efectividad de los resultados ofrecidos por el dispositivo en personas bajo el efecto de benzodiacepinas.





## 5. Herramientas y métodos

Los materiales que se utilizaron para llevar acabo el dispositivo fueron los siguientes:

- Microcontrolador Raspberry Pi 4 Model B de 4GB de memoria RAM.<sup>16</sup>
- Módulo de cámara NoIR Raspberry Pi versión 2.1.<sup>17</sup>
- Módulo Pantalla display táctil XPT2046 de 3.5P<sup>18</sup>
- Módulo de sistema de alimentación interrumpida (UPS) EP-0118.<sup>19</sup>
- Par de baterías de litio 18650 recargables.<sup>20</sup>
- Par de diodos emisores de luz blanca.
- Par de resistencias de 330 Ohmios.
- Par de diodos emisores de luz infrarroja.
- Filtro de luz visible (película fotográfica revelada).
- Impresora Creality 3D Ender-3.
- Royo plástico negro PLA.
- Espuma de poliuretano.
- Cintas sujetadoras.
- Hebillas.
- Alcohólimetro: Alcohol tester Drive Safety.A

Con respecto a los softwares que se emplearon estos se detallan a continuación:

- SketchUp Pro 2022.
- 3D Builder.
- Lenguaje de programación orientado a objetos Python 3.7.<sup>21</sup>

- Módulo de visión artificial OpenCV 4.5.1.48.<sup>22</sup>
- Módulo de procesamiento de matrices de uso general Numpy 1.18.1.<sup>23</sup>
- Módulo especializado en el manejo y análisis de estructuras de datos Pandas 1.0.1.<sup>24</sup>
- Módulo especializado en la creación de gráficos en dos dimensiones Matplotlib 3.1.3.<sup>25</sup>
- Módulo especializado en la creación de interfaces gráficas wxPython 4.0.4.<sup>26</sup>
- Módulo para el control de la cámara PiCamera 1.13.<sup>27</sup>
- Módulo especializado en trabajo con tiempo time incluido en la biblioteca estándar de Python 3.7.<sup>28</sup>
- Módulo para el control de entradas y salidas del microcontrolador Raspberry Pi, GPIO-Zero 1.5.1.<sup>29</sup>
- Módulo especializado en inteligencia artificial Scikit-learn<sup>30</sup>

## 6. Desarrollo de Ingeniería

### 6.1. Dispositivo provisorio

El primer paso para la realización del dispositivo fue el bosquejado de las distintas partes de este, desde el apoyo en el rostro como así también donde se alojaría la cámara y el microcontrolador.

Luego se imprimió la primer versión del dispositivo, como se puede observar en la Figura 6.1 y Figura 6.2.

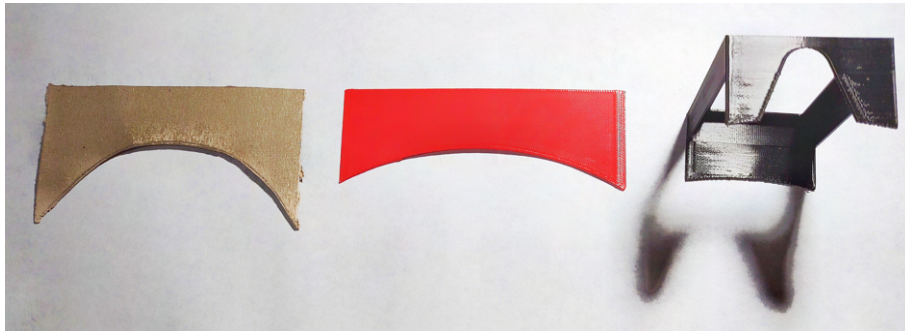


Figura 6.1: Primeras impresiones del dispositivo provisorio.

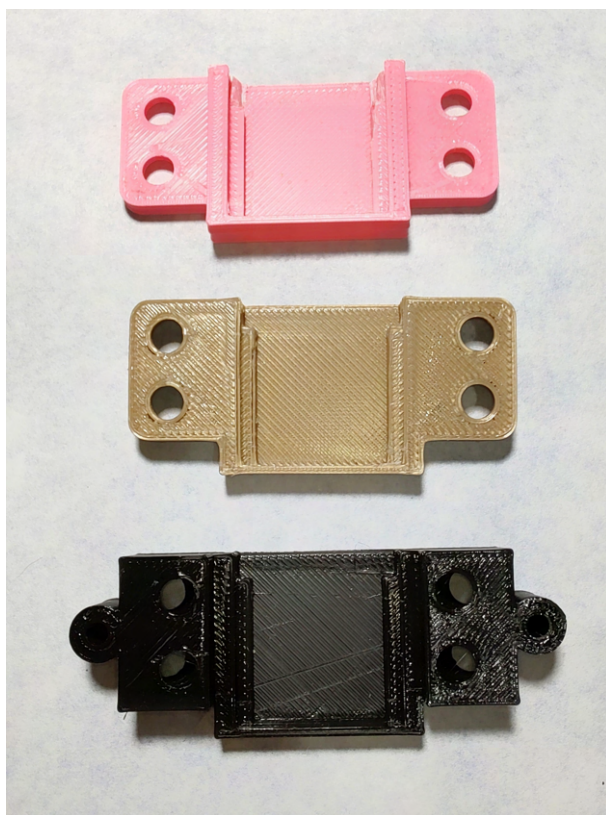


Figura 6.2: Primeras impresiones del soporte para la cámara

Después de varias pruebas y errores se llegó a la primera versión completa que contiene la unidad central de proceso, Raspberry Pi 4, el módulo de cámara NOIR, Raspberry Pi Cam V2.1, el par de leds infrarrojos y el par de leds blancos.

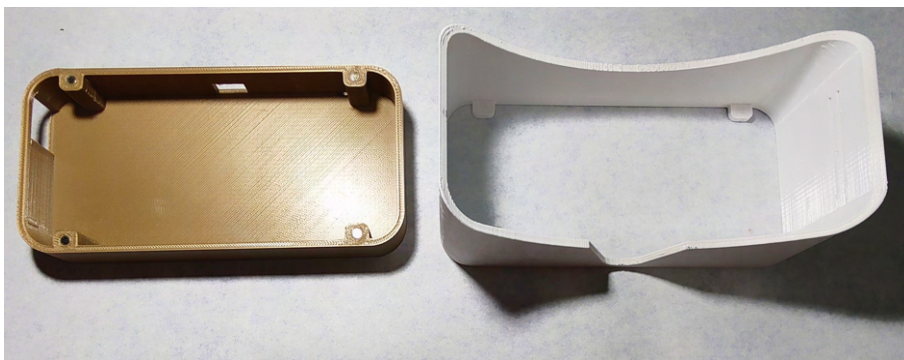


Figura 6.3: Primera versión del dispositivo.

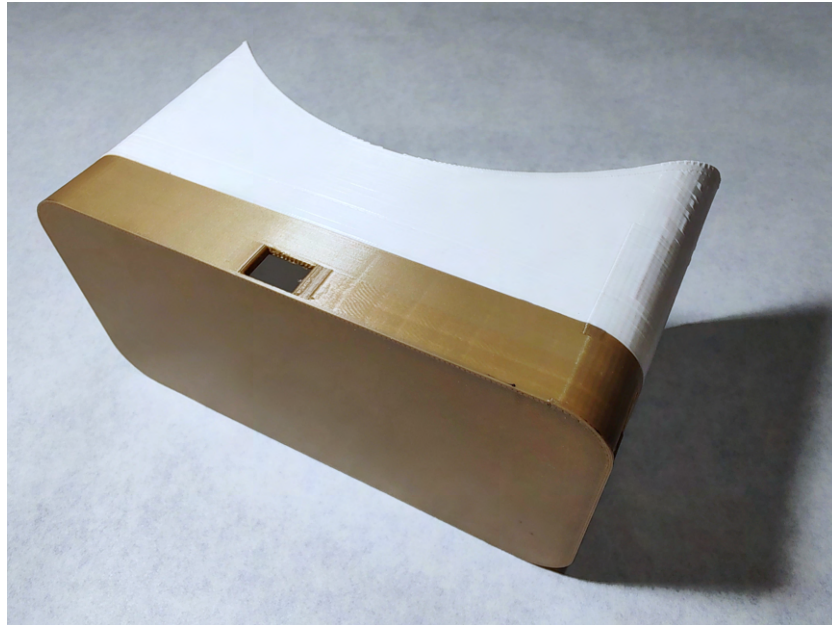


Figura 6.4: Primera versión del dispositivo.

Luego de llevar acabo ensayos se procedió con la segunda versión que se aprecia en la Figura6.5 y Figura6.6, se logró imprimir un dispositivo provisorio que cumplió con todas las características necesarias para una correcta obtención del vídeo, facilitando el procesamiento de imágenes integrando de forma exitosa todos los componentes del hardware.



Figura 6.5: Segunda versión del dispositivo.

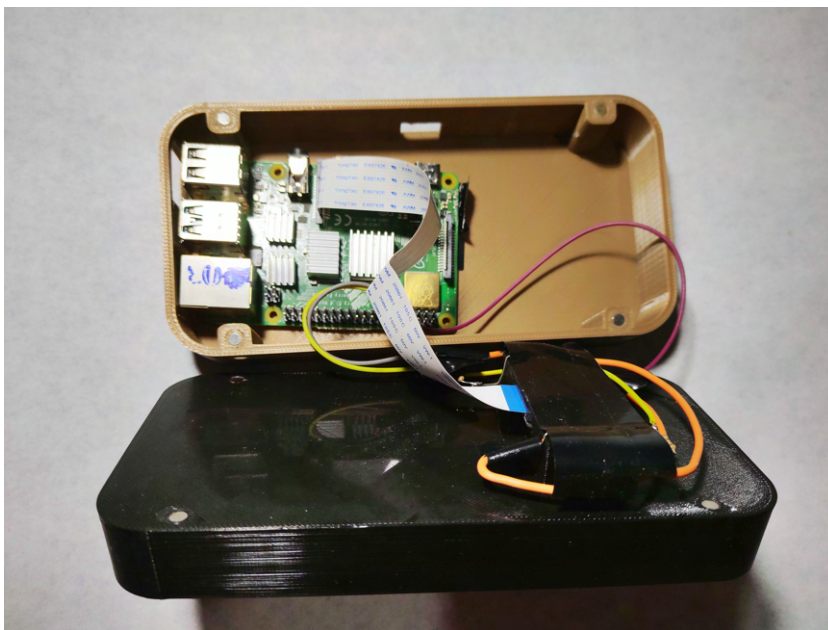


Figura 6.6: Segunda versión del dispositivo.



## 6.2. Software

El programa realizado consiste en un software capaz de determinar si la persona a la cual se le realiza el test ha consumido alguna droga depresora del sistema nervioso central o no, para lo cual se basa en una pupilografía. En la Figura 6.7 se detalla el diagrama de flujo principal del programa con las principales funciones que este realiza.

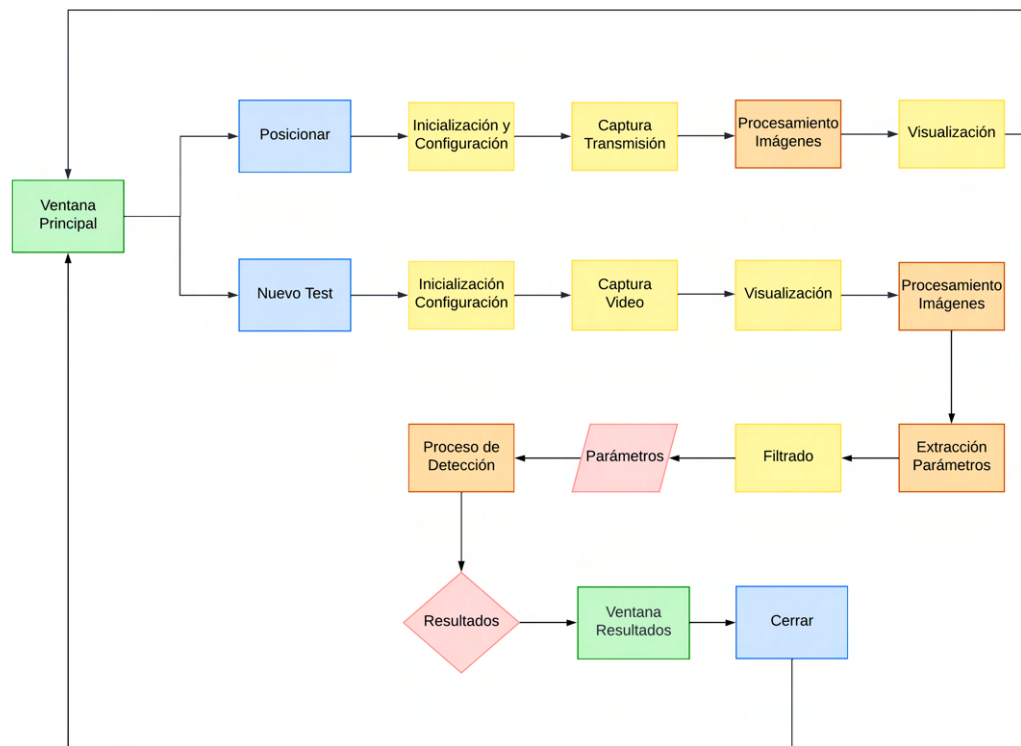


Figura 6.7: Diagrama de flujo principal.

A continuación, se detalla cada elemento.

### 6.2.1. Ventana Principal

El software se inicia con la ventana principal la cual se puede observar en la Figura 6.8, esta posee dos botones: *Posicionar* y *Nuevo Test* además de un mensaje que indica al usuario lo siguiente *Colocar dispositivo, Posicionar, Realizar nuevo test*". Para la realización de la ventana se utilizó el módulo *wxPython 4.0.4*.<sup>26</sup>

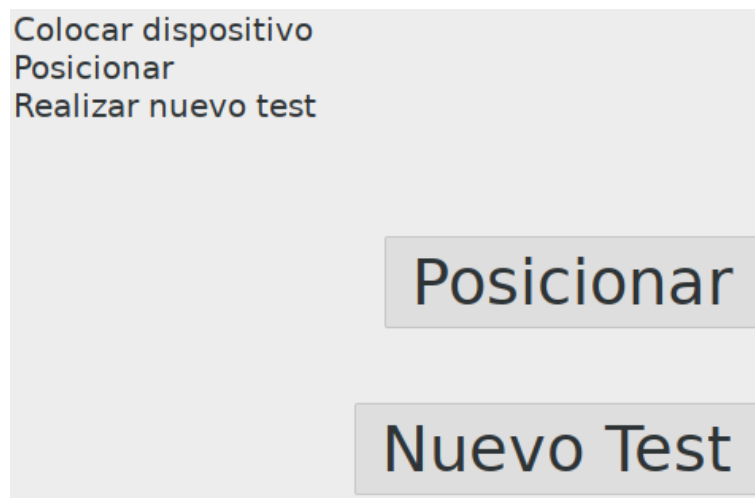


Figura 6.8: Ventana principal.

Como el mensaje lo indica, el primer paso es colocarle el casco a la persona a la cual se le va a realizar el test. Luego de esto es preciso seguir con la correcta posición del ojo de la persona dentro de la región de interés seleccionando el botón *Posicionar* y por último realizar el test correspondiente.

Es de destacar que para la ejecución de las múltiples operaciones (interfaz gráfica, control de periféricos, y procesamiento específico del dispositivo) en el mismo espacio de proceso el módulo utilizado para el manejo de subprocesos es el módulo *threading*.<sup>31</sup>

### 6.2.2. Posicionamiento

En la Figura 6.9 se detalla el diagrama de flujo que realiza el programa al seleccionar la opción *posicionar*.

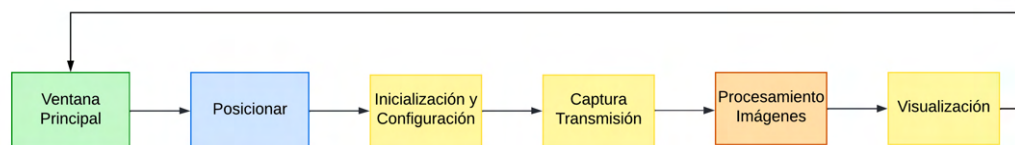


Figura 6.9: Diagrama de flujo botón *posicionar*.

#### Inicialización y Configuración

Para la configuración de la cámara se utilizó el módulo *PiCamera 1.13*,<sup>27</sup> para el control de los leds el módulo *GPIOZero 1.5.1*.<sup>29</sup> y para la conformación del tiempo a transmitir las imágenes *Time*.<sup>28</sup> La metodología utilizada y los parámetros que se configuraron son los



siguientes: La resolución se configuró en 1280 x 720 píxeles, y 60 cuadros por segundos. El tiempo de precalentamiento de la cámara es de 0.1 segundos y el tiempo de transmisión es de 10 segundos. Con respecto a los leds blancos se configuraron en la salida 6 de la Raspberry Pi mientras que los infrarrojos en la salida 16.

### Captura y procesamiento

El procesamiento de imágenes, captura y visualización de la transmisión se llevo a cabo mediante el módulo *OpenCV 4.5.1.48*.<sup>22</sup> El primer paso en esta etapa es la captura de un cuadro al cual se lo redimensiona para la correcta visualización por la pantalla del dispositivo mediante una interpolación cúbica. Luego a esta se le dibuja un círculo negro donde se encuentra el centro del brillo de los leds. La pupila de la persona se debe colocar sobre este círculo, debido a que el brillo no es uniforme en toda la región, perjudicando la detección de la pupila en el procesamiento posterior, y además el centro del R.O.I. coincide con este círculo.

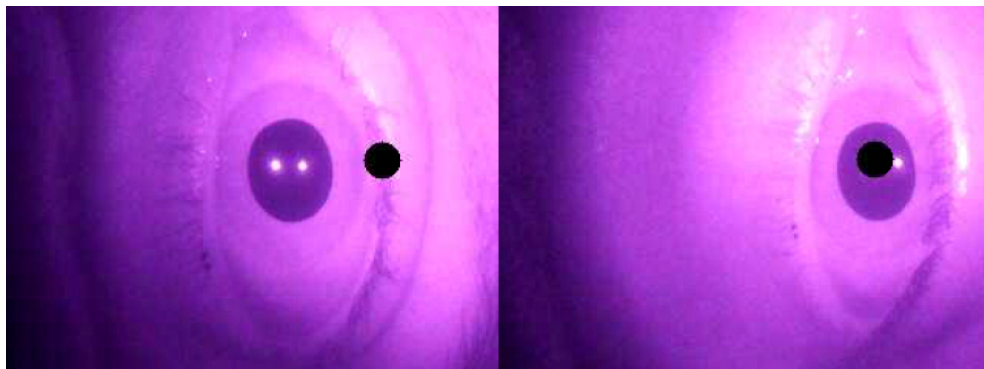


Figura 6.10: Capturas obtenidas antes y después del posicionamiento.

### Visualización

Por último se produce la visualización de cada cuadro a lo largo de los 10 segundos como se observa en la Figura6.10. Es importante señalar que en el proceso debido a las bajas prestaciones del display se pierden varios cuadros, pero a los objetivos de posicionar a la persona cumple con su objetivo. Luego de transcurrido el tiempo la ventana emergente se cierra y se vuelve a la ventana principal.

#### 6.2.3. Nuevo Test

En la Figura6.11 se detalla el diagrama de flujo que realiza el programa al seleccionar la opción Nuevo Test.

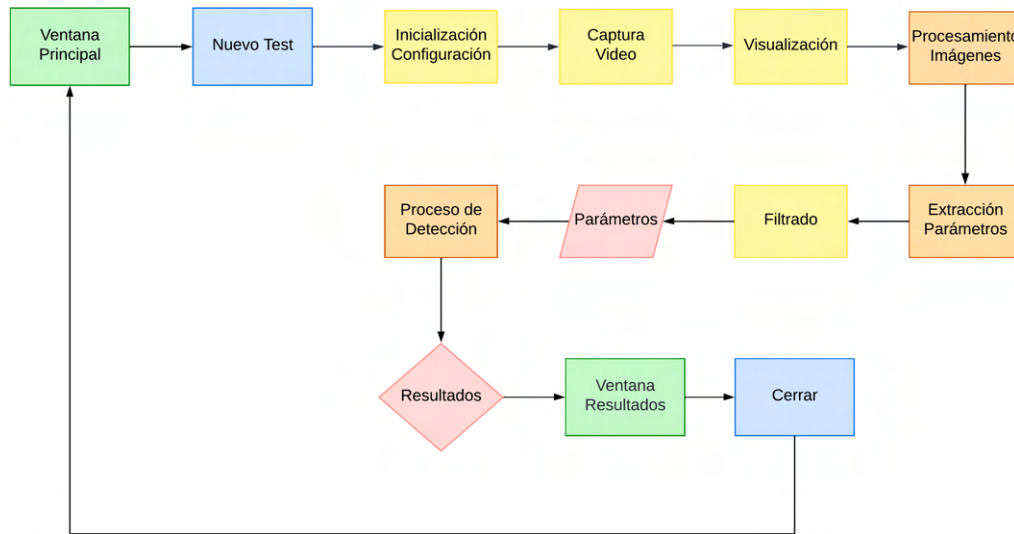


Figura 6.11: Diagrama de flujo botón posicionar.

### Iniciación y Configuración

Para la inicialización de los leds, puertos, variables de la cámara, resolución, cuadros por segundo y tiempo de precalentamiento se utilizaron mismos valores que los descritos en la sección 6.2.2. Luego de ello se procede con la obtención de nombre del próximo vídeo, este se extrae del archivo adjunto *nombre.txt* el cual en este caso se decidió identificar con un número entero. Dicha tarea se realiza con el fin de no sobre escribir el archivo y así borrarlo. Luego de obtener el nombre se le suma uno y se vuelve a guardar dicha modificación en el archivo.

### Captura Vídeo

Una vez que se tiene el identificador con el que se va a guardar el vídeo del nuevo test y los leds infrarrojos son encendidos con anticipación, se procede a la captura del vídeo, en principio este tiene un formato *.h264*. A penas comienza la grabación se encienden los leds blancos por un lapso de 0.2 segundos, de esta manera se produce el estímulo lumínico por el cual se va a producir la miosis y así poder medir los parámetros seleccionados, luego se apagan y se sigue capturando por un periodo de 1.5 segundos hasta que se interrumpe y se apagan los leds infrarrojos.

Una vez terminada la captura se reproduce el vídeo por pantalla, como se menciona en la Sección 6.2.2 se producen pérdidas de cuadros en la visualización pero a términos prácticos cumple su cometido.

Después se transforma el formato del vídeo ya grabado a *.mp4* para su siguiente procesamiento, es así que en la carpeta donde se encuentra el programa se generan dos archivos de vídeo, uno con extensión *.h264* y otro con extensión *.h264*

Luego de ello se debe agrupar y estructurar la información de forma de que sea de fácil acceso, para ello se utiliza la herramienta *Pandas*<sup>24</sup> que proporciona estructuras de datos y herramientas de análisis de datos fáciles de usar y de alto rendimiento.<sup>24</sup> En este caso se crea un *DataFrame*, que posee 3 columnas las cuales son: Frame, Tiempo y Área y una extensión de filas acorde a la cantidad de cuadros que posee el vídeo. La extracción de esta información es de vital importancia para el procesamiento posterior, la cantidad de frames se realiza mediante una función incorporada en el módulo *OpenCV 4.5.1.48*.<sup>22</sup> Una vez que se conoce este dato, con la configuración inicial de 60 cuadros por segundo y la siguiente ecuación se consigue tener el tiempo entre cuadros.

$$\text{Tiempo entre cuadros} = \frac{1}{\text{Cuadros por segundo}} \quad (6.1)$$

De aquí en más el procesamiento lo hará para cada cuadro del vídeo teniendo que procesar grandes volúmenes de datos. En la Figura 6.12 se puede apreciar la imagen antes del procesamiento.

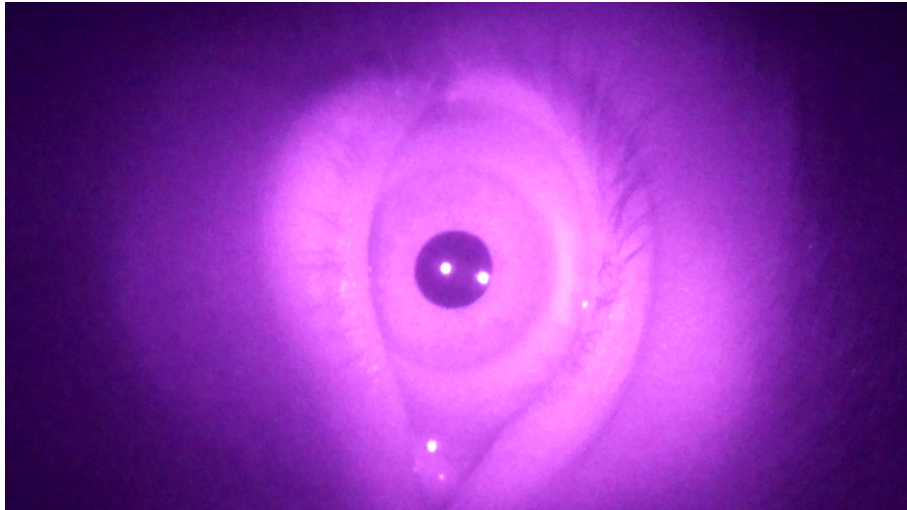


Figura 6.12: Imagen previa al procesamiento.

#### 6.2.4. Procesamiento de Imágenes

En la Figura 6.13 se detalla el diagrama de flujo del procesamiento que se le realiza a la imagen



Figura 6.13: Diagrama de flujo procesamiento de imágenes

### Selección de ROI

El primer paso es seleccionar un área de interés donde se posiciona la pupila, considerando que el vídeo original se graba con una resolución de 720P, es decir, con una disposición de 1280 píxeles por 720 píxeles, esta ubicación se encuentra entre los  $[0;500]$  de alto y  $[350;850]$  de ancho. En la Figura 6.14 se observa la discriminación de área.

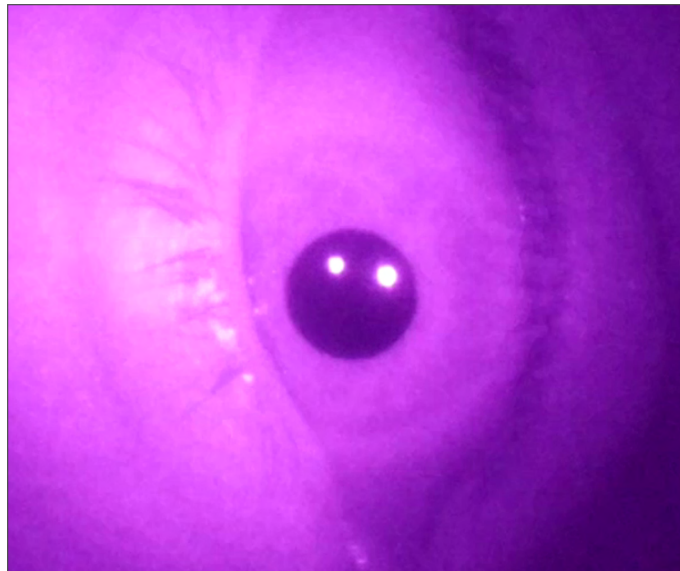


Figura 6.14: Selección del área de interés donde se posiciona la pupila.

### Escala de Grises

Luego de ello se procede a pasar nuestra imagen a la escala de grises como se observa en la Figura 6.15

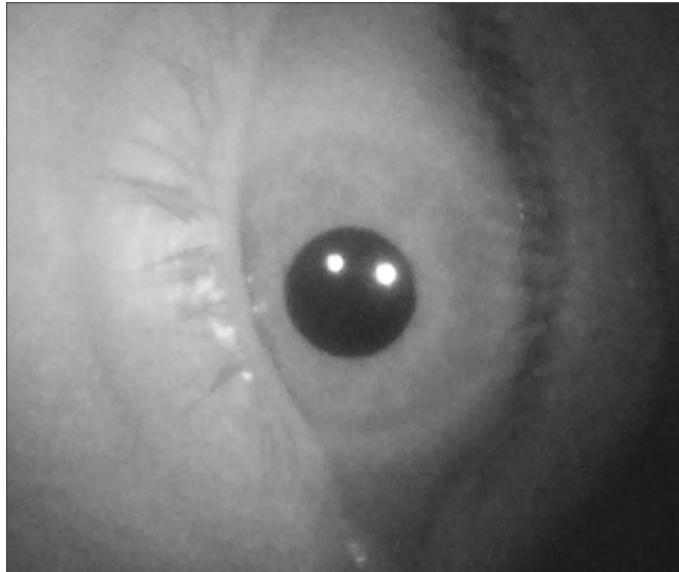


Figura 6.15: Imagen pasada a escala de grises.

### Umbralización

Después se realiza una umbralización debido a que el método de segmentación de pupila posee mejor respuesta si realiza este proceso. Se decidió llevar a cero todos los pixeles que posean un valor de gris mayor a 120.

En la Figura 6.16 se observan los resultados de este proceso.

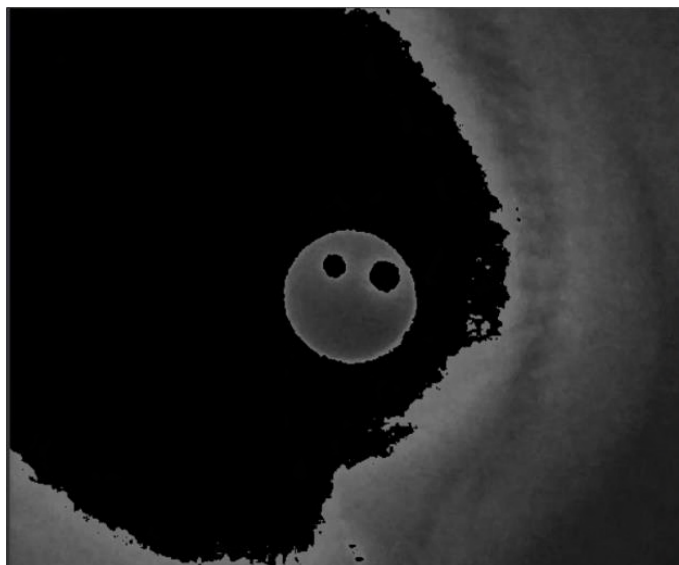


Figura 6.16: Imagen luego de la umbralización.

### Operaciones Morfológicas

Como se observa en la Figura 6.16, se detectan los reflejos de los leds infrarrojos en la pupila y, debido a ser puntos luminosos, el algoritmo los umbraliza otorgándole un valor de 0, por ello se ven de color negro. Para eliminar de la imagen estos círculos se procede a utilizar las denominadas "*operaciones morfológicas*". Precisamente se realizaron procesos de dilatación seguidos de erosiones lo que genera un cierre de la pupila eliminando los reflejos. Para ello se utilizó un kernel de  $[3,3]$  y 15 iteraciones para cada operación.

En la Figura 6.17 se contempla la imagen luego de la realización de las operaciones morfológicas.

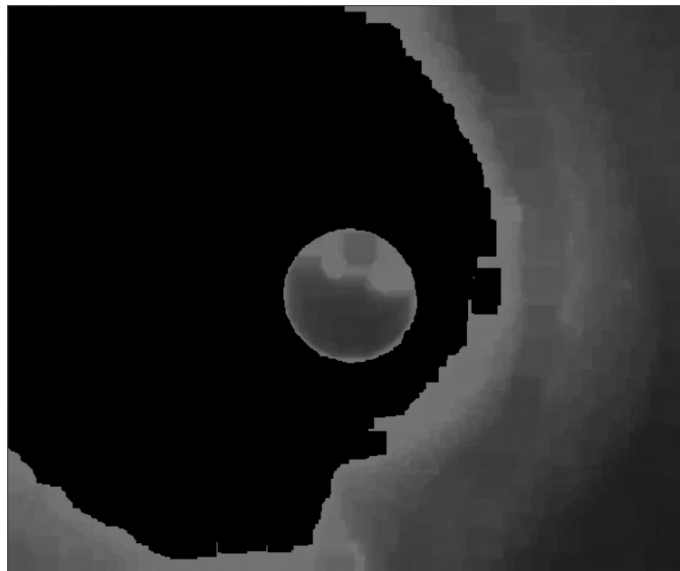


Figura 6.17: Imagen luego de aplicar operaciones morfológicas.

### 6.2.5. Extracción de Parámetros

En la Figura 6.18 se detalla el diagrama de flujo que realiza el programa para extraer los parámetros a analizar.

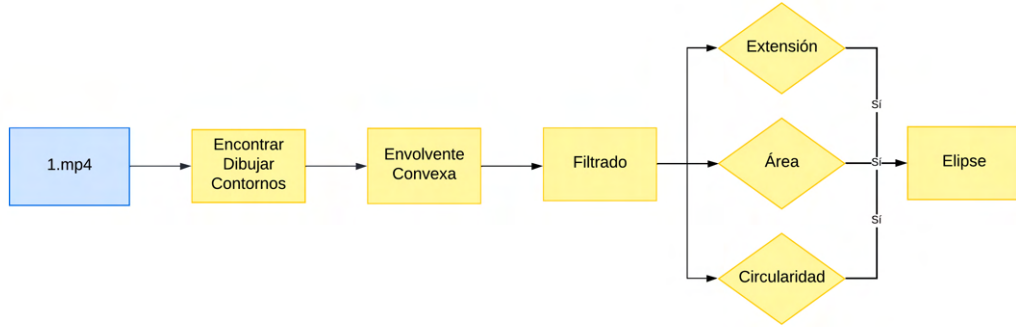


Figura 6.18: Diagrama de flujo de la extracción de parámetros.

### Encontrar y Dibujar Contornos

El método por el cual se segmenta la pupila, y por el que se obtendrán los parámetros a contrastar, comienza por encontrar y dibujar contornos en la imagen ya procesada. Para lograr esto se utilizó la función de la librería *OpenCV*,<sup>22</sup> *findContours()*<sup>32</sup> quien encuentra, almacena y devuelve los contornos sin ninguna relación jerárquica, es decir, todos los puntos del contorno. Y la función *drawContours()*<sup>33</sup> la cual dibuja los contornos devueltos *findContours()*.

### Envolvente convexa

Luego se encuentra la envolvente convexa de los contornos, dicha tarea se cumple mediante la función *funcion\_convexHull()*<sup>34</sup> calcula la envolvente convexa de un conjunto de puntos 2D utilizando el algoritmo

### Filtrado de contornos

A continuación se calcula un rectángulo que contenga a la envolvente, mediante la función *boundingRect()*.<sup>36</sup> Esto se realiza para poder calcular la siguiente relación entre el área y su rectángulo contenedor:

$$Extensión = \frac{Área \text{ Contorno}}{Área \text{ Rectángulo Contenedor}} \quad (6.2)$$

Los contornos que tengan una relación mayor a 0.8 se los descarta ya que no se condice con el área de la pupila. También se utiliza como filtro a el tamaño del área, ya que se descartan los que se encuentren por debajo de 1800 y por encima 30000. Estos parámetros se tomaron debido a que la distancia que se encuentra la cámara y el tamaño de la pupila, el área de esta última jamás estará por fuera de estos valores.

Continuando con el proceso se calcula la circunferencia al área detectada por medio de la función `arcLength()`<sup>37</sup> para poder calcular la circularidad mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Circularidad} = \frac{\text{Circunferencia}^2}{4\pi \cdot \text{Área del Contorno}} \quad (6.3)$$

Al no tratarse la pupila de un círculo perfecto no se puede trabajar con una circularidad de 1, es por eso que se trabajan con áreas que posean una circularidad entre 1 y 1.4 descartando el resto.

Ya definiendo un área con parámetros de extensión, tamaño y con una circularidad dentro de lo esperado para una pupila, se prosigue a determinar el centro de dicha área por medio de la función `moments()`<sup>38</sup> la cual calcula todos los momentos hasta el tercer orden de un polígono.

### Dibujar Elipse

Luego se debe ajustar una elipse alrededor del contorno y dibujarla en la imagen, para ello se utilizo la función `fitEllipse()`<sup>39</sup> la cual calcula la elipse que mejor se ajusta, en un sentido de mínimos cuadrados, a un conjunto de puntos 2D. En la Figura 6.20 se ven los resultados del proceso, en azul se distinguen los contornos y de verde el centro y el perímetro de la pupila.

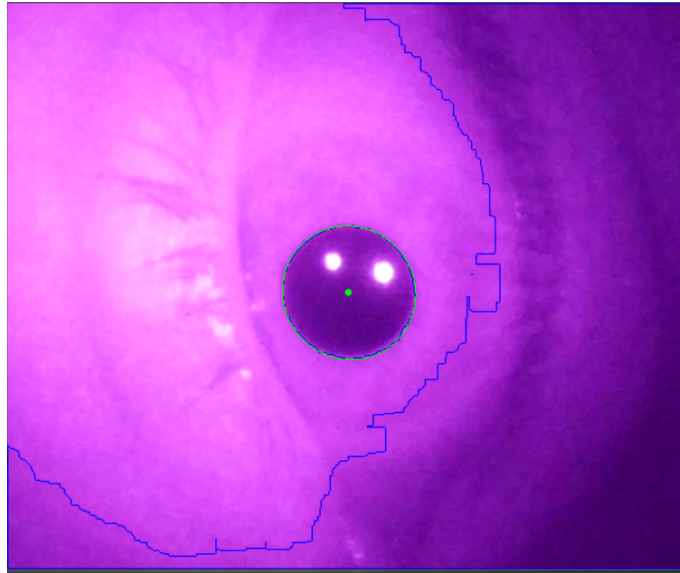


Figura 6.19: Contornos dibujados y pupila detectada

Por último, se realiza la carga del área a cada cuadro.



### 6.2.6. Filtrado

*Con la circunferencia detectada en cada cuadro, se calcula el área de ella, con esto solo resta seleccionar el cuadro donde se inicia la miosis y el cuadro donde ella se completa para medir tiempo de respuesta y comprar el valor de área inicial y final a fin de calcular la amplitud relativa. Cabe aclarar que el valor que se obtiene luego de realizar este proceso no indica una unidad de medida, si no que valores figurativos.*

*Para realizar estas tareas se le aplicó un filtro de mediana a los valores de áreas obtenidas y se computaron sus derivadas discretas, a las cuales también se le aplicó un filtro de mediana. En los siguientes gráficos se pueden observar estos dos parámetros en función del tiempo al cual corresponde cada cuadro.*

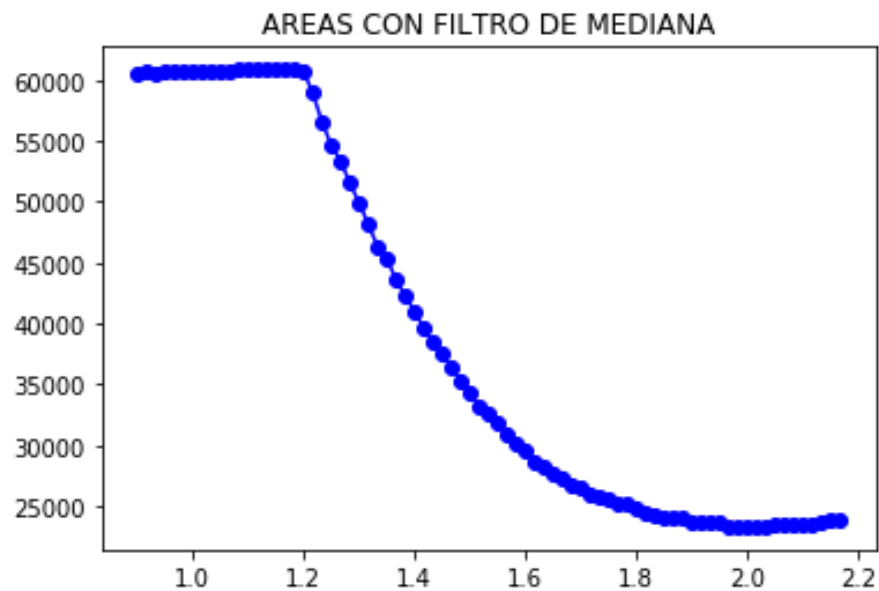


Figura 6.20: Gráfico de la mediana de los valores de área con respecto al tiempo de cada cuadro.

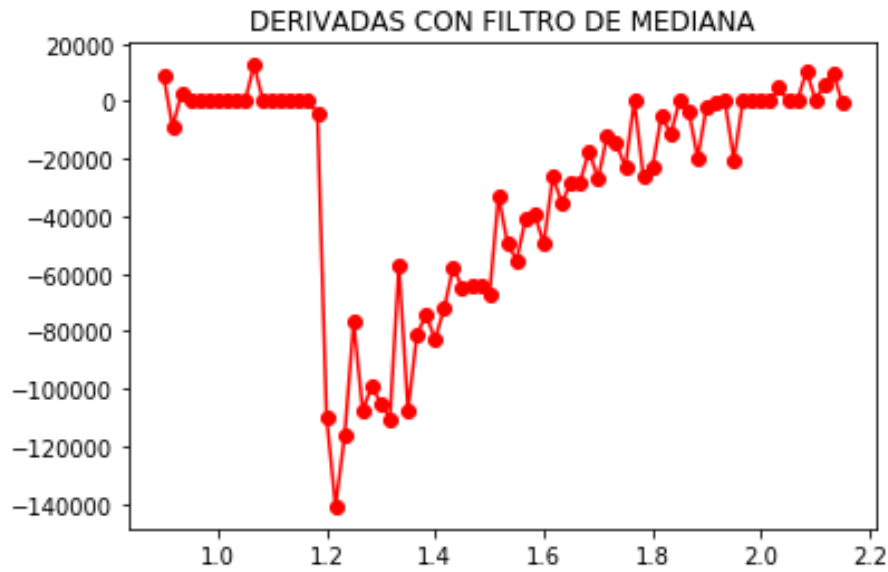


Figura 6.21: Gráfico de la mediana de los valores de la derivada de las áreas con respecto al tiempo de cada cuadro.

Debido a que con la curva de derivadas se obtiene un cambio más rápido y ponderativo, se decidió tomar este parámetro para seleccionar el cuadro inicial y con esto el segundo y área de la pupila a la hora del comienzo del test. Mientras que para la selección del cuadro final se utilizó la curva de áreas sin derivar.

### 6.2.7. Parámetros

Una vez determinado el cuadro inicial y final solo resta calcular la resta entre el tiempo final y el inicial para obtener el tiempo de la prueba mientras que la amplitud relativa se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Amplitud Relativa} = 100 - \frac{\text{Área Final} \cdot 100}{\text{Área Inicial}} \quad (6.4)$$

### 6.2.8. Proceso de Detección

Para el proceso de detección se decidió realizar el test a diez personas que no hayan consumido drogas en las últimas 24 horas con el fin de obtener una base de datos de parámetros.

En la Figura 6.22 se observan con puntos azules los resultados de las muestras.

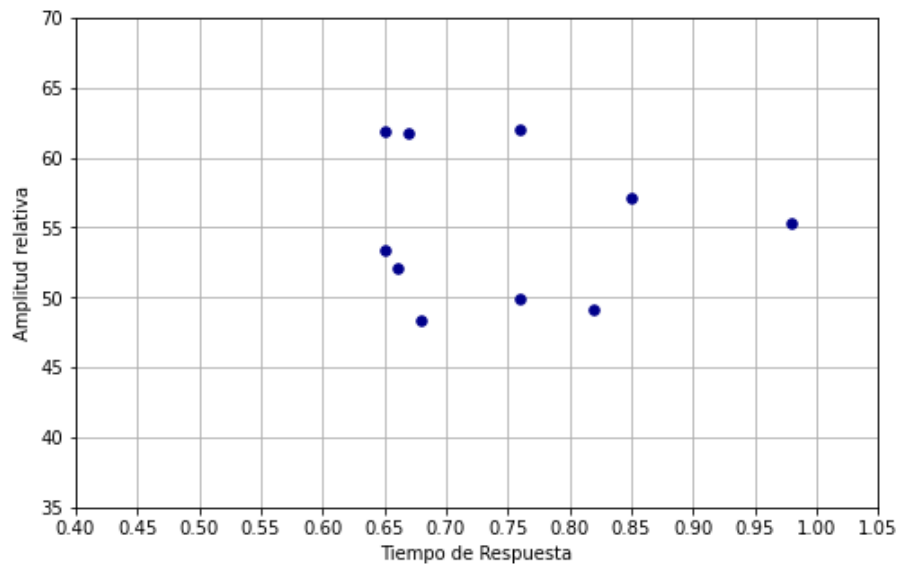


Figura 6.22: Gráfico con los resultados pruebas en personas sin drogas.

*También se le realizó el test a 5 personas que consumieron T.H.C. en un rango menor a treinta minutos, la metodología se explica en el Capítulo 8.*

*En la Figura6.23 se observan con puntos rojo los resultados de las muestras junto con las muestras de las personas sin drogas en azul*

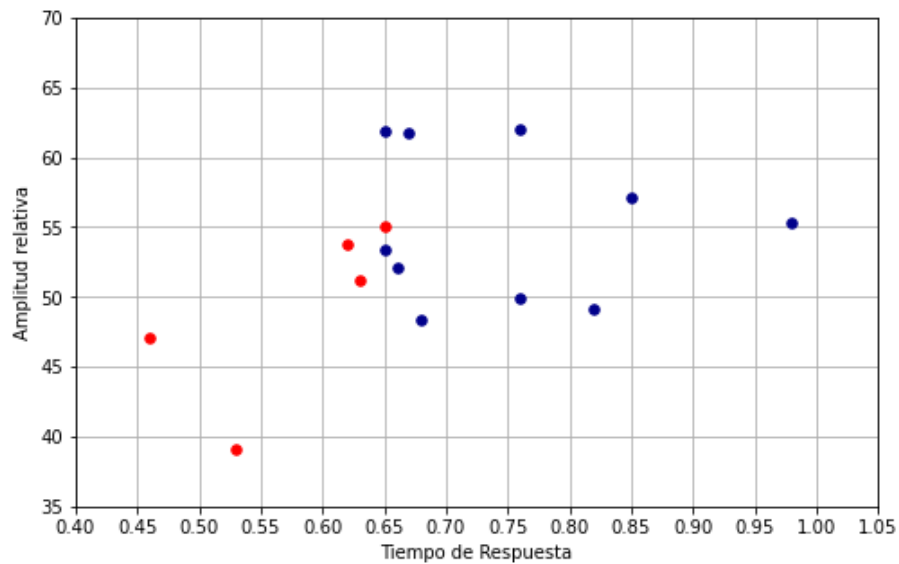


Figura 6.23: Gráfico con los resultados de las pruebas en personas con y sin drogas.

El modelo utilizado para la determinación de los resultados pertenece al módulo especializado en inteligencia artificial Scikit-learn,<sup>30</sup> precisamente se utilizó el clasificador *Decision-TreeClassifier()*<sup>40</sup> con una cantidad de diez nodos. El árbol obtenido luego del entrenamiento se visualiza en la Figura6.24.

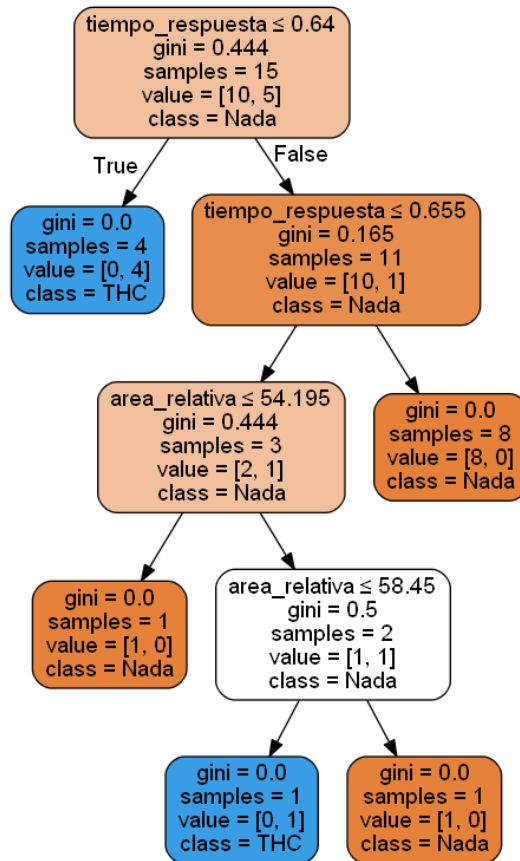


Figura 6.24: Árbol de decisión obtenido luego de entrenar el modelo.

Debido a la falta de muestras se decidió probar el modelo con los mismos datos con los que se entrenó y como era de esperarse su resultado fue 1, es decir, predijo correctamente todos los test. En la Figura6.25 se observa la matriz de confusión obtenida.

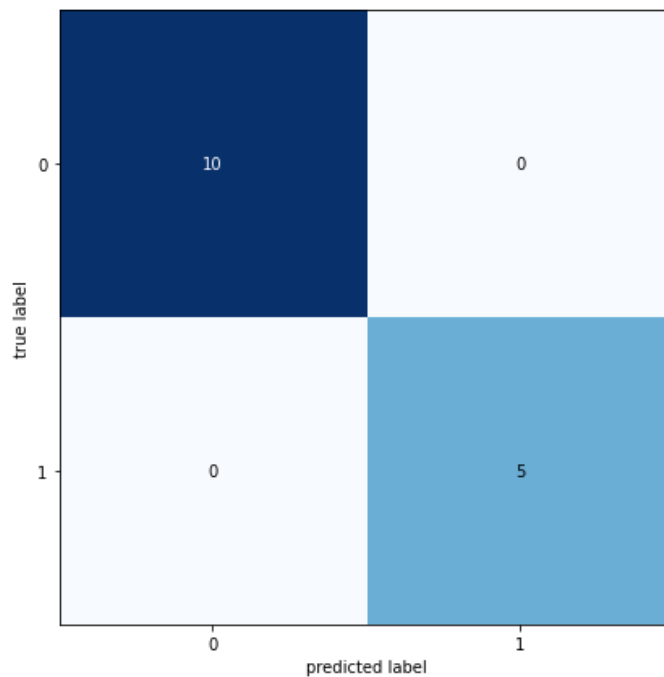


Figura 6.25: Matriz de confusión.

*Es así que se utiliza dicho modelo para determinar los resultados de los test que se realicen.*

### 6.2.9. Ventana Resultados

*A continuación se procede a mostrar los distintos resultados por pantalla. Estos son los siguientes:*

#### Sin resultados

*En el caso de que no se haya podido obtener los parámetros sensados, por un parpadeo o ruido introducido por las pestañas, el mensaje será el siguiente:*

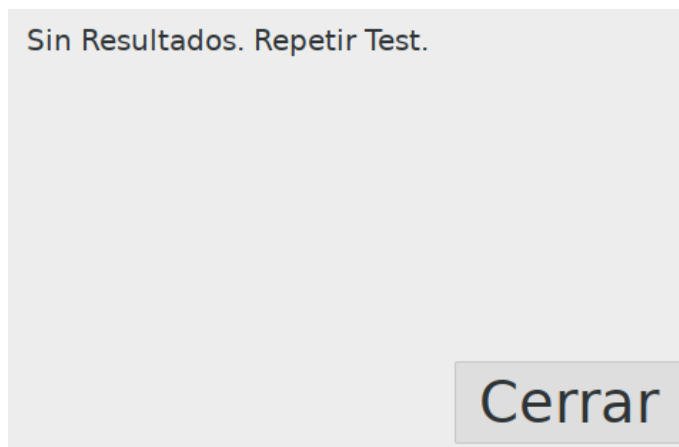


Figura 6.26: Ventana Resultados, sin resultados.

### Resultado Positivo

*En el caso de que el resultado sea positivo se imprime el siguiente mensaje:*

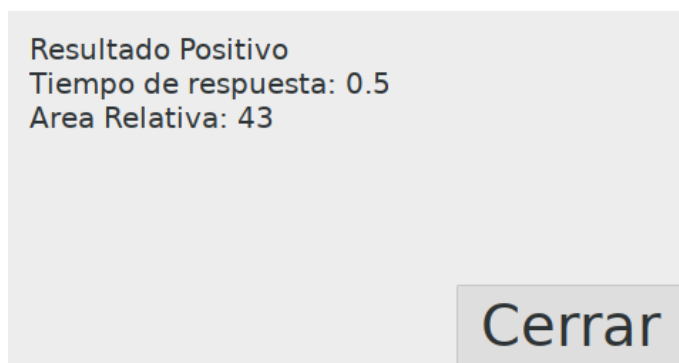


Figura 6.27: Ventana Resultados, positivo.

### Resultado Negativo

*En cambio si el resultado es negativo se observa:*

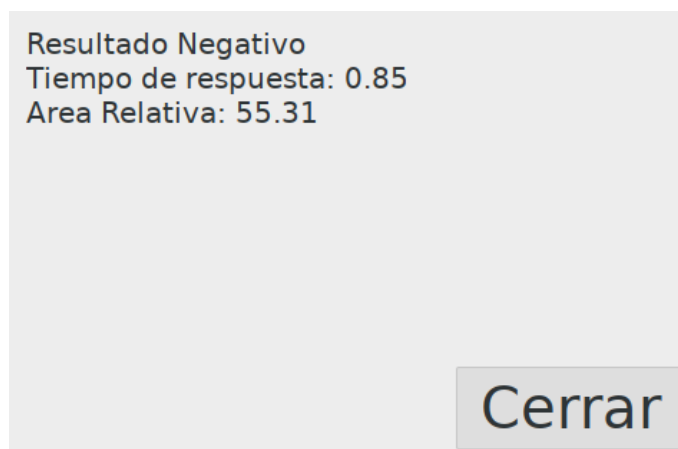


Figura 6.28: Ventana Resultados, negativo.

### 6.3. Pantalla y batería

*Con el dispositivo provisorio se comprobó que la realización de pruebas con dispositivo conectado a una fuente de alimentación y a un monitor para poder visualizar la interfaz gráfica, y por ende los resultados, lo torna muy engorroso. Y para poder realizar test de forma remota en puestos de control se decidió incorporar al dispositivo baterías y una pantalla.*

### 6.4. Dispositivo definitivo

*Así es que se realizó el dispositivo definitivo que cuenta de 3 partes desmontables. A continuación se observan dichas partes junto con sus medidas.*

#### **Carcasa donde se encuentra la pantalla**

*Además del orificio de la pantalla se observan 3 orificios los cuales se corresponden con el botón de encendido del módulo de baterías, y por ende el dispositivo, entrada para la carga del módulo y dos puertos U.S.B. para la conexión de periféricos de ser necesario.*

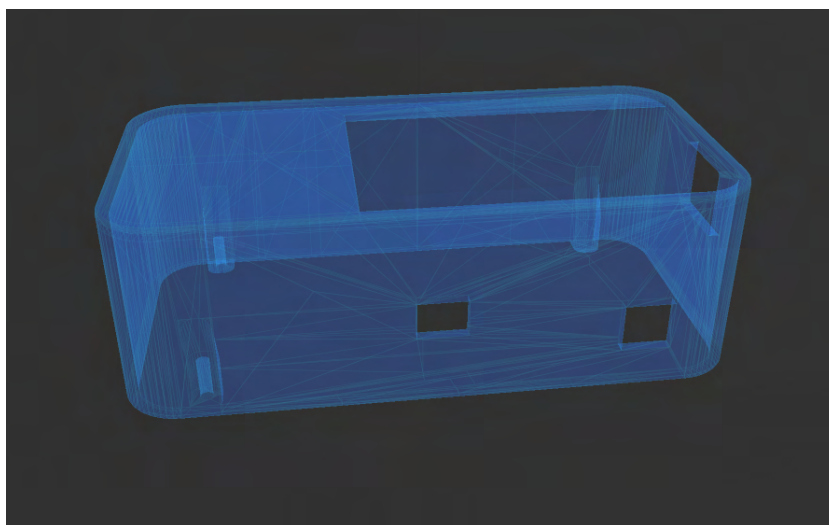


Figura 6.29: Carcasa pantalla vista RX.

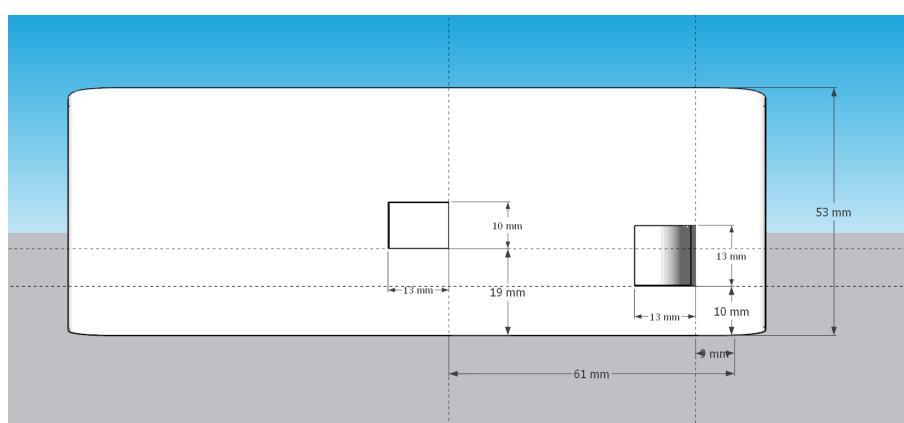


Figura 6.30: Carcasa pantalla vista anterior.



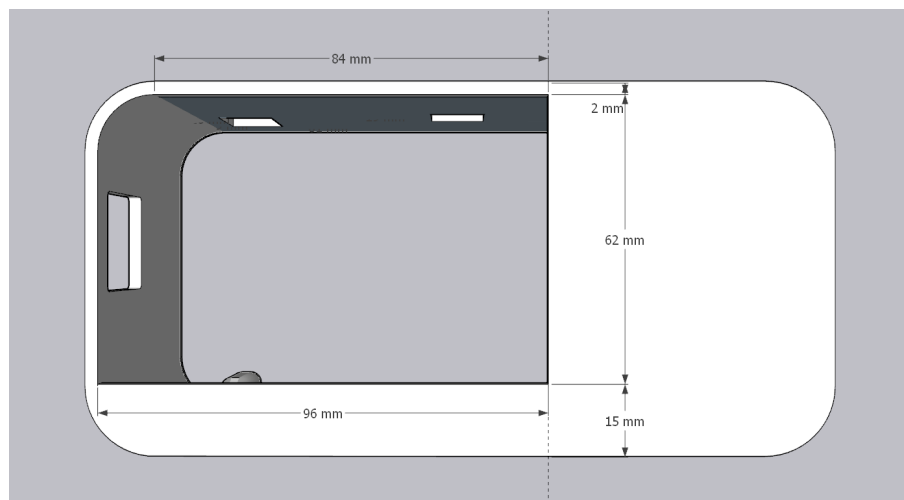


Figura 6.31: Carcasa pantalla vista superior.

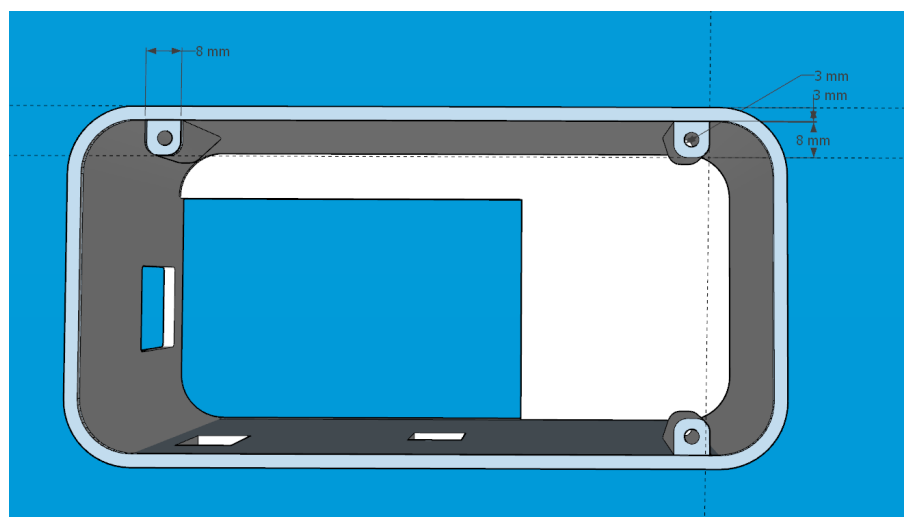


Figura 6.32: Carcasa pantalla vista inferior.

### Carcasa donde se apoya el rostro

*Se destacan los orificios de la cámara, junto con los de los leds, además de las rendijas donde se encuentran las cintas sujetadoras.*

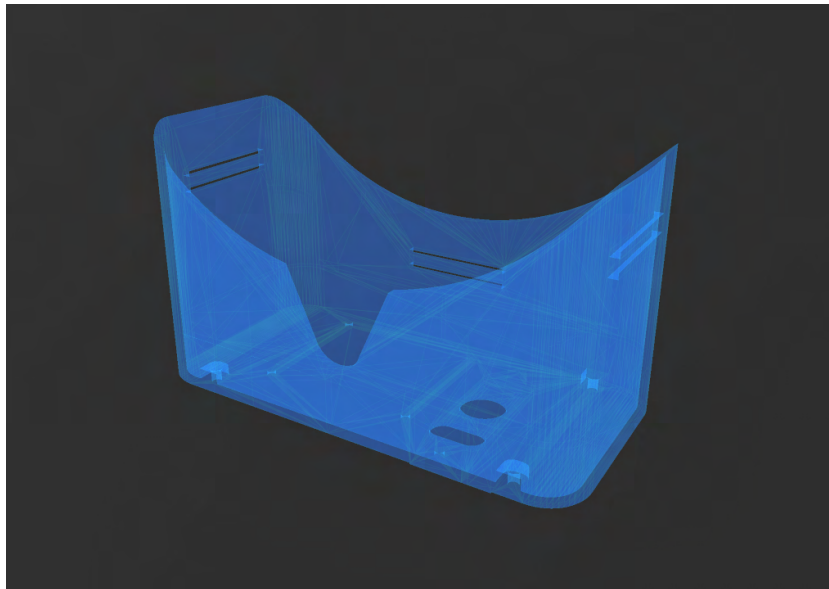


Figura 6.33: Carcasa donde se apoya el rostro vista RX.

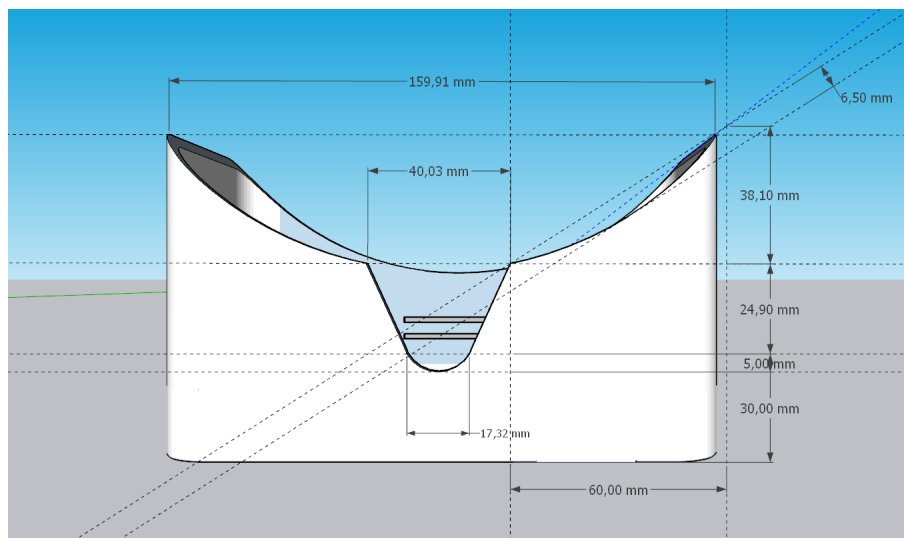


Figura 6.34: Carcasa donde se apoya el rostro vista frontal.

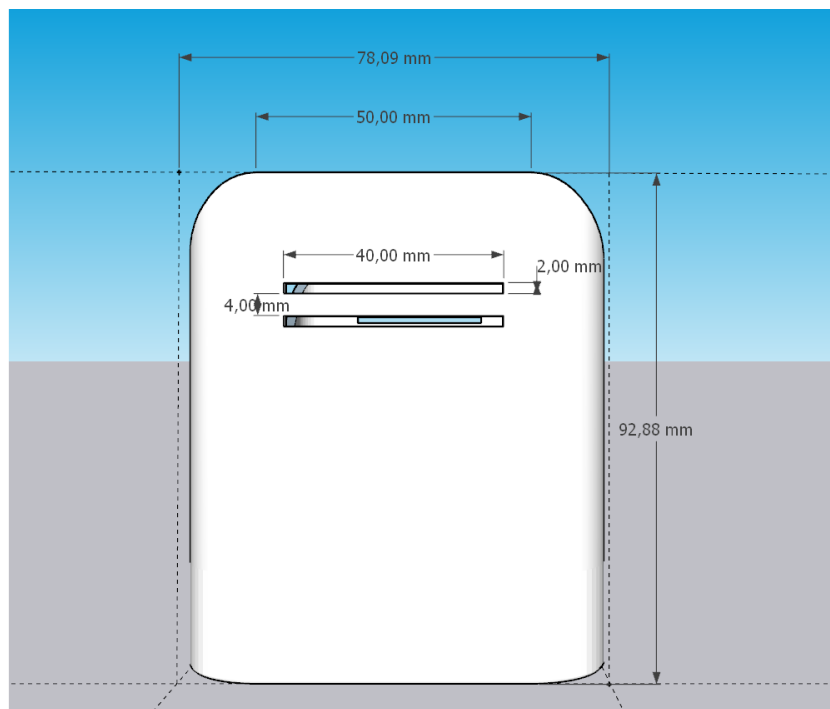


Figura 6.35: Carcasa donde se apoya el rostro vista lateral.

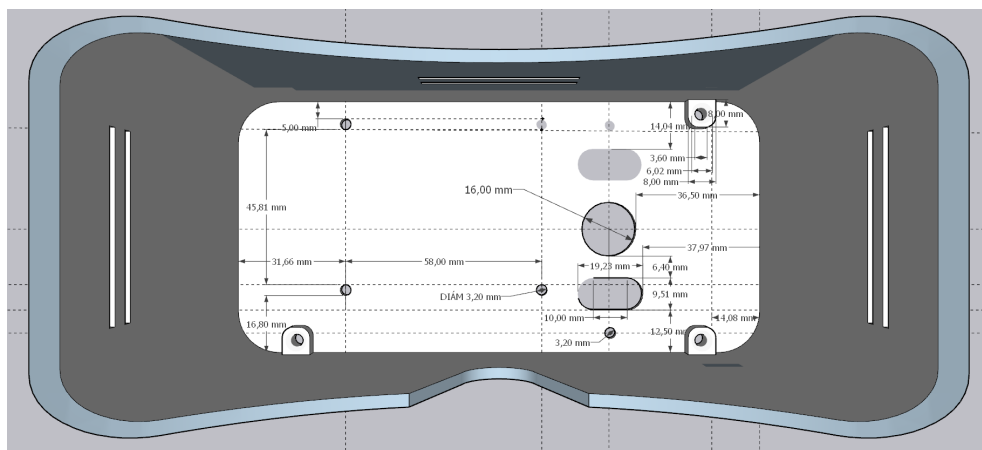


Figura 6.36: Carcasa donde se apoya el rostro vista superior.

### Carcasa contenedora de la cámara

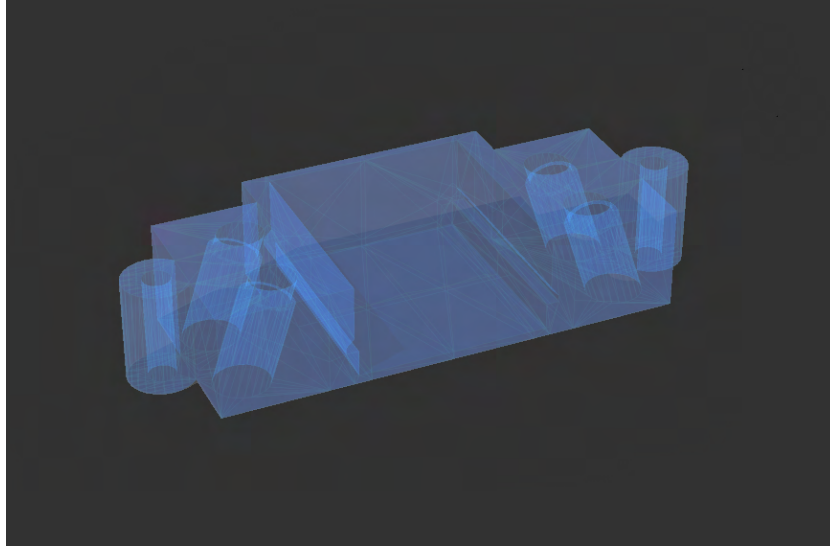


Figura 6.37: Carcasa contenedora de la cámara vista RX.

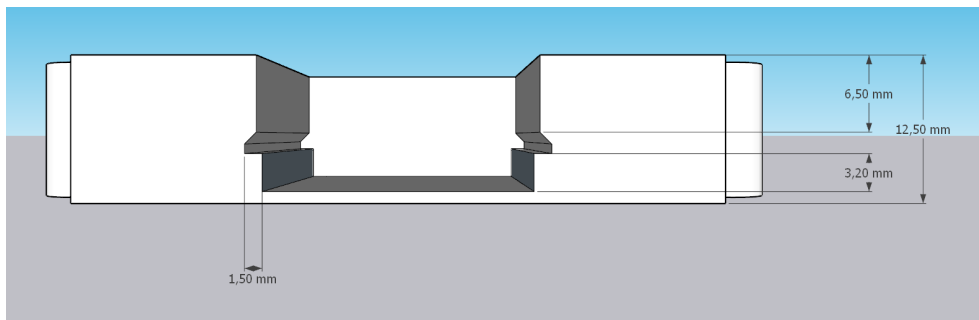


Figura 6.38: Carcasa contenedora de la cámara vista frontal.

*En la Figura 6.39 se observa la vista frontal donde se aprecia el ángulo de los porta leds, esto se diseñó así para que la posición del ojo sea perpendicular a la posición de estos y tener la mayor luminosidad en esta zona.*

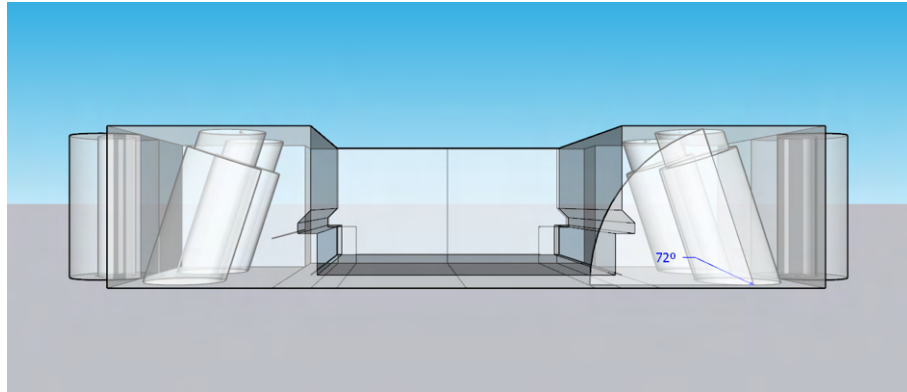


Figura 6.39: Carcasa contenedora de la cámara vista frontal con medida ángulo leds.

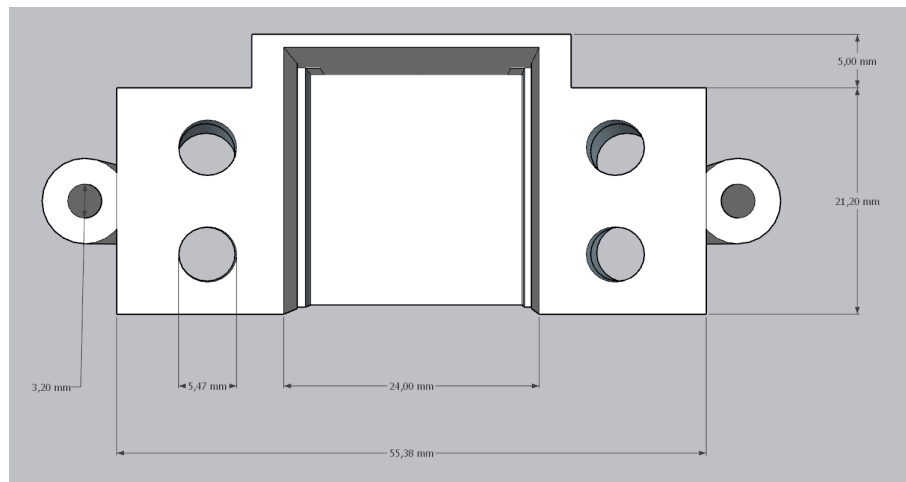


Figura 6.40: Carcasa contenedora de la cámara vista superior.

### Dispositivo definitivo

*En la Figura 6.41 se observa el dispositivo definitivo.*



Figura 6.41: Dispositivo definitivo.

## 7. Análisis económico

Se realiza un análisis económico del proyecto teniendo en cuenta el tiempo de desarrollo y la fabricación del dispositivo. Para esto se considera el precio de los materiales y componentes necesarios para realizar el dispositivo y el costo del tiempo que llevó el desarrollo de software y las pruebas en sujetos.

### 7.1. Hardware

Con respecto al dispositivo se utilizaron los componentes que se detallan en la tabla 7.1. Los proveedores con los que se trabajó fueron locales de productos electrónicos que se observan en la tabla 7.2. En cuanto a la mano de obra, se consideró el costo de las horas trabajadas para el desarrollo del dispositivo considerando el valor de la hora de ingeniería dado en los honorarios brindados por el Consejo Profesional de Ingenieros y Geólogos de Mendoza y el costo de matriculación. Se consideraron 23 días laborales, 1 mes, con jornadas laborales de 8 horas. En la tabla 7.3 se aprecia el costo de la mano de obra en el diseño e impresión del hardware.

Tabla 7.1: Tabla de componentes

Componentes	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Microcontrolador Raspberry Pi 4 Model B 4GB	1	\$35.000	\$35.000
Módulo de cámara NoIR Raspberry Pi versión 2.1.	1	\$8.663	\$8.663
Módulo Pantalla display táctil XPT2046 de 3.5P	1	\$3539	\$3539
UPS EP-0118	1	\$5639	\$5639
Batería de litio recargable 18650	2	\$1040	\$2080
Diodo emisor de luz blanca de 5V L51	2	\$99	\$198
Resistencia de 180 $\Omega$	2	\$43	\$86
Diodo emisor de luz infrarroja de 5V L53	2	\$134	\$268
Filtro de luz visible	1	-	-
Impresora Creality 3D Ender-3	1	\$67849	\$67849
Royo plástico PLA	1	\$7800	\$7800
Espuma de Poliuretano	1	\$700	\$180
Cinta sujetadora	2	\$317	\$634
Hebillas de plástico	3	\$100	\$300

Tabla 7.2: Tabla de proveedores

Proveedor	Calidad	Disponibilidad	Ubicación
Starware	Óptima	1 Semana	Buenos Aires
Electrónica Mendoza S.A.	Óptima	Inmediata	Mendoza
Electrónica GA-VI	Óptima	Inmediata	Mendoza

Tabla 7.3: Balance de mano de obra hardware

Item	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Horas de diseño	184	\$1.500	\$276.000
Matrícula ingeniero	1	\$7.600	\$7.600



## 7.2. Software

Los aspectos económicos del área de software se destacan las licencias de los softwares utilizados y las horas dedicadas a la realización del mismo. El único programa pago que se utilizó fue SketchUp Pro 2022 el cual tiene un precio de US\$299 que corresponden a \$58.604 pesos. En cuanto a la mano de obra se consideraron 35 días laborales, un mes y medio, con jornadas laborales de 8 horas. En la tabla 7.4 se aprecia el costo.

Tabla 7.4: Balance de mano de obra software

Item	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Horas de programación	280	\$1.500	\$420.000
Licencia SketchUp Pro 2022	1	\$58.604	\$58.604

## 7.3. Pruebas en sujetos

En cuanto a las pruebas en sujetos y análisis de resultados se consideraron 12 días laborales con jornadas de 4 horas por día. El análisis económico que arrojó se visibiliza en la tabla 7.5

Tabla 7.5: Balance económico realización de pruebas en sujetos

Item	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Horas de pruebas	96	\$1.500	\$144.000
Alcoholímetro: Alcohol tester Drive Safety	1	\$2640	\$2640



## 8. Resultados

### 8.1. Tetrahydrocannabinol

Como se comentó en la Sección 6.2.8 el dispositivo se evaluó en 5 personas que consumieron Tetrahydrocannabinol (T.H.C.) y se evaluaron sus parámetros. La dosis que se utilizó fue la que regularmente consumían los sujetos.

El protocolo consta de la colocación del dispositivo al sujeto, posicionarlo, y luego realizar una cuenta regresiva y solicitar que cuando concluyera abrieran el ojo y que no intentaran parpadear hasta finalizar el test.

A los sujetos se le realizaron pruebas antes del consumo y luego de transcurridos treinta minutos. En la Figura 8.1 se observan los tiempos de respuestas obtenidos por cada sujeto de prueba.

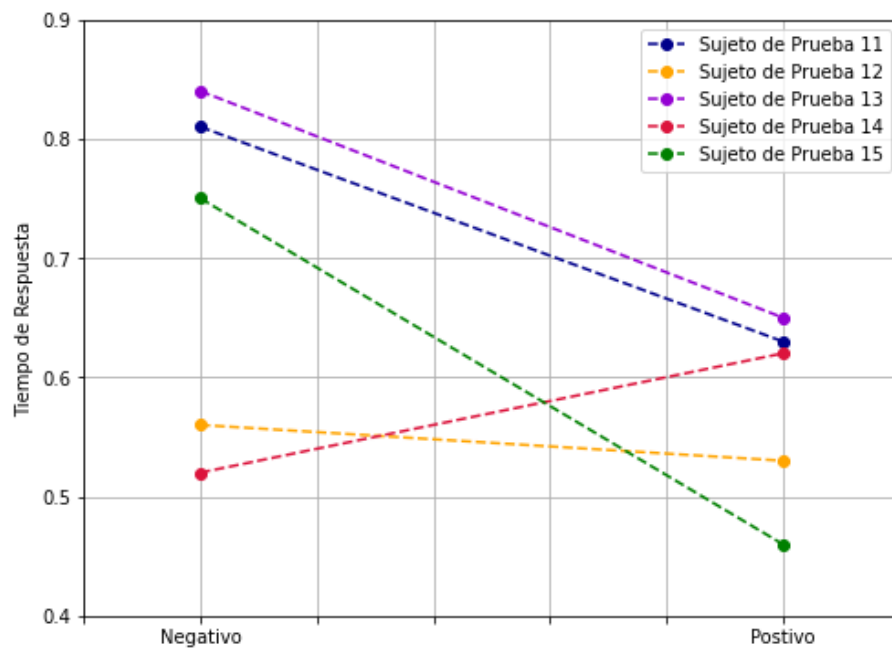


Figura 8.1: Resultados para el parámetro tiempo de repuesta en los cinco sujetos de prueba

Se distingue una tendencia a bajar el tiempo de respuesta, resultado que se condice con lo obtenido en “*The potential of infrared pupillography in routine police traffic checks*”<sup>5</sup> excepto en el sujeto de prueba 14 de color rojo en el que hubo un aumento del tiempo de respuesta.

En la Figura 8.2 se discriminan las amplitudes relativas.

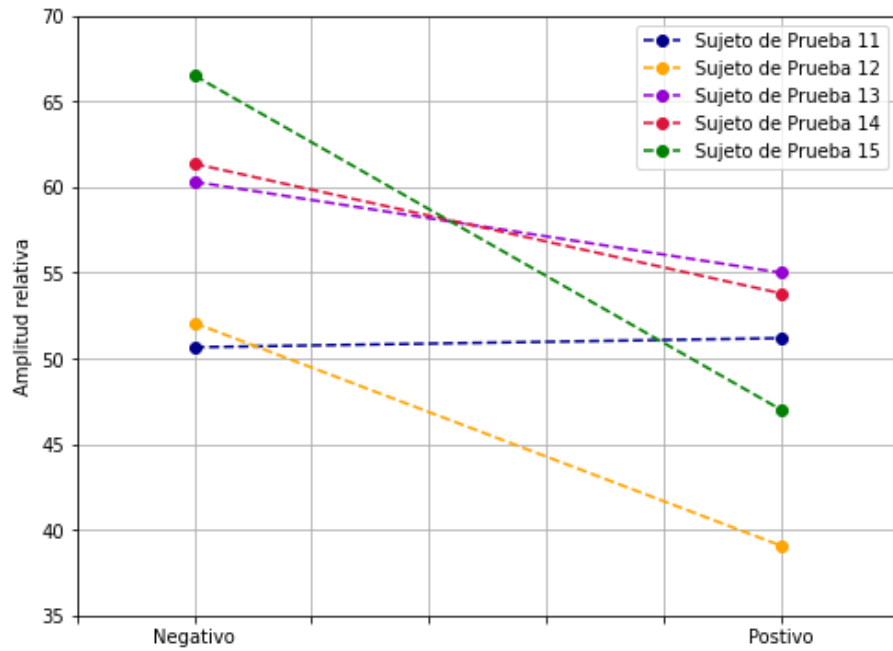


Figura 8.2: Resultados para el parámetro amplitud relativa en los cinco sujetos de prueba

Se puede distinguir una tendencia a la baja, como lo obtenido en “*Pupil function as an indicator for being under the influence of central nervous system-acting substances from a traffic-medicine perspective*”<sup>4</sup> excepto en el sujeto de prueba 11 en el cual hubo un leve aumento.

En la Figura 8.3 se observa el gráfico de dispersión de la amplitud relativa en función del tiempo de respuesta.

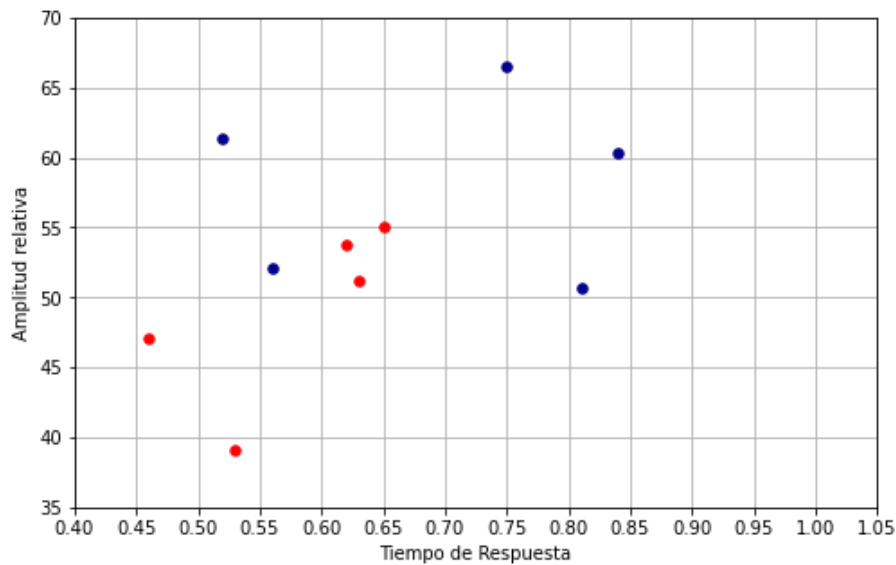


Figura 8.3: Resultados para el parámetro amplitud relativa amplitud relativa en función del tiempo de respuesta en las diez pruebas

Los resultados antes del consumo de la droga, puntos azules, se encuentran por arriba del 55 % respecto al área relativa y/o con un tiempo de respuesta por encima de 0.65 segundos como se observa en los resultados diez pruebas sin droga de la Figura 6.23, excepto por una de las pruebas que se encuentra por debajo de estos límites.

## 8.2. Alcohol

En este caso el dispositivo se evaluó en 5 personas las cuales consumieron alcohol, la alcoholemia de cada sujeto se constató mediante el alcoholímetro, teniendo 3 resultados posibles como se indica en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Tabla resultados alcoholímetro.A

BAC	Luz
0.00 % - 0.02 %	Verde
0.02 % - 0.05 %	Amarilla
$\geq 0,05$ %	Roja y amarilla

Se realizó una prueba antes del consumo y luego de sesenta minutos, debido a que el alcohol se ingiere se requiere de mínimo treinta minutos para ser metabolizado. Antes de las

pruebas se midió la alcoholemia y se obtuvo en todos los primeros test previo al consumo una luz verde es decir entre 0.00 % - 0.02 %. Mientras tanto las 5 pruebas de alcoholemia posteriores a la ingesta obtuvieron un resultado mayor a  $\geq 0,05$  %.

En la Figura 8.4 se discriminan los tiempos relativos.

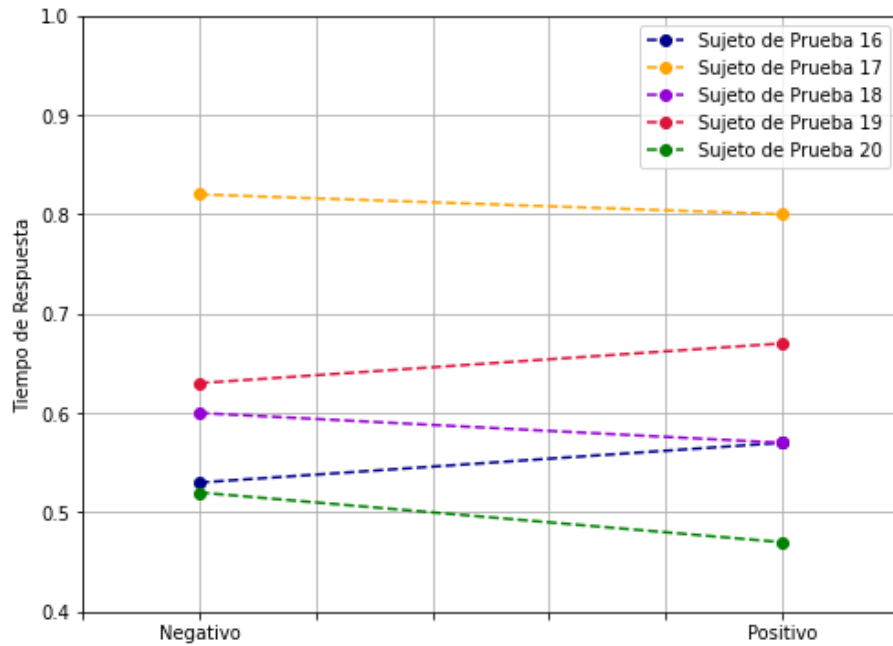


Figura 8.4: Resultados para el parámetro tiempo de repuesta en los cinco sujetos de prueba

Se distingue una disminución del tiempo de respuesta luego del consumo para los sujetos de prueba 17, 18 y 20, en tanto para los sujetos de prueba restantes se produjo un aumento.

En la Figura 8.5 se discriminan las amplitudes relativas.

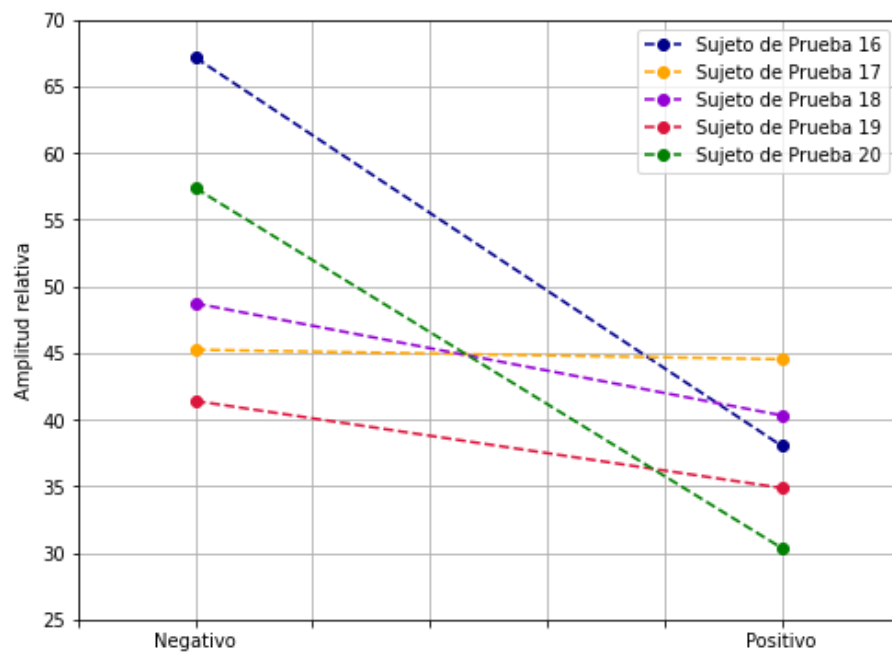


Figura 8.5: Resultados para el parámetro amplitud relativa en los cinco sujetos de prueba

En este caso se produjo una caída en todos los sujetos después de la ingesta, siendo muy evidente en los sujetos de prueba 16 y 20.

En la Figura 8.6 se observa el gráfico de dispersión de la amplitud relativa en función del tiempo de respuesta.



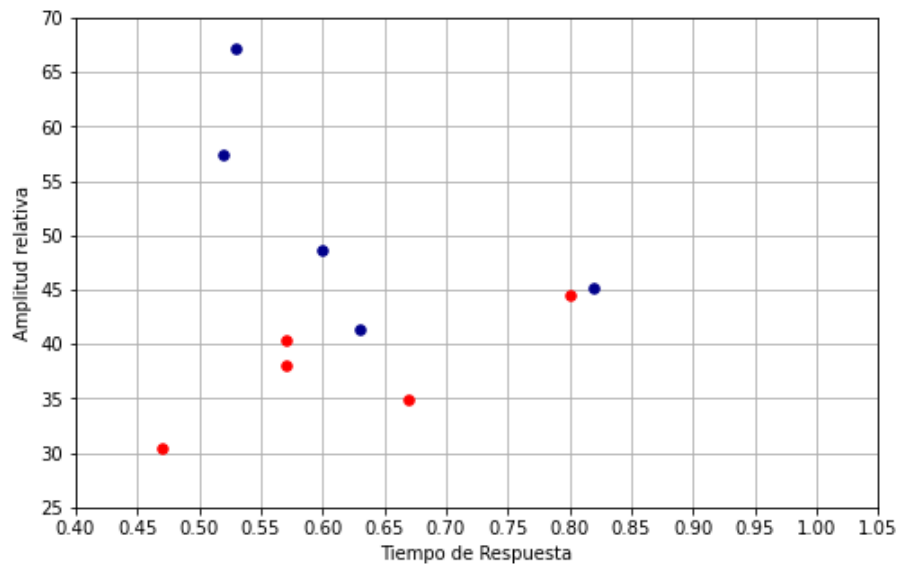


Figura 8.6: Resultados para el parámetro amplitud relativa en función del tiempo de respuesta en las diez pruebas

Los resultados después del consumo de alcohol, puntos rojos, se encuentran por debajo del 55 % respecto al área relativa y/o con un tiempo de respuesta por encima de 0.65 segundos, excepto por el sujeto de prueba 17. Mientras que los resultados antes de la ingesta de la droga son dispares, tres sujetos de pruebas se encuentran dentro de los límites esperados y dos dentro de los parámetros esperados para personas que hayan consumido.

### Resultados Dispositivo

Los resultados otorgados por el dispositivo, basándose en el modelo descrito en la Sección 6.2.8, se aprecia en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Tabla resultados Dispositivo.

Sujeto de Prueba	Alcoholímetro	Dispositivo
16	Negativo	Positivo
16	Positivo	Positivo
17	Negativo	Negativo
17	Positivo	Negativo
18	Negativo	Positivo
18	Positivo	Positivo
19	Negativo	Positivo
19	Positivo	Negativo
20	Negativo	Positivo
20	Positivo	Positivo

Se obtienen cuatro resultados idénticos entre el alcoholímetro y el Dispositivo, de los restantes se tienen cuatro falsos positivos y dos falsos negativos.

## 9. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un sistema capaz de sensar la dinámica pupilar del sujeto y constatar con valores normales para inferir el consumo de drogas psicoactivas. Se Puede concluir, a partir del desarrollo de cada etapa del mismo, lo siguiente:

- Se pudo diseñar e imprimir un dispositivo que integre hardware y brinde condiciones de oscuridad. En cuanto al tamaño de este es aceptable pero el suministro de energía le otorga demasiado peso. El display si bien cumple con su función no otorga gran sensibilidad, se pierden muchos cuadros en la visualización de los vídeos. Además, el sistema de agarre resulta engorroso.
- La coordinación de estímulos lumínicos con la obtención de imágenes se realizó con éxito, pero la cantidad de leds que se utilizaron, dos infrarrojos y dos blancos, conlleva a que la posición del ojo del paciente sea muy buena para la correcta detección de la pupila.
- Los algoritmos utilizados para el procesamiento de imágenes funcionaron de manera óptima, siempre y cuando el sujeto al que se le realiza la prueba no parpadee, mire en la dirección indicada y realice una correcta apertura ocular.
- El filtrado de los parámetros para la detección correcta del cuadro inicial y final resultó funcional, la determinación del cuadro inicial a partir de las derivadas es un excelente indicador, pero se debe encontrar un método mejor para la elección del cuadro final.
- Los parámetros sensados, tiempo de respuesta y amplitud relativa de la pupila, se midieron correctamente, pero no es posible compararlos con los resultados de los sujetos de los estudios científicos “*The potential of infrared pupillography in routine police traffic checks*”<sup>5</sup> y “*Pupil function as an indicator for being under the influence of central nervous system-acting substances from a traffic-medicine perspective*”<sup>4</sup> debido a que no se tiene información de los parámetros seteados por el pupilógrafo allí utilizado.
- El modelo utilizado para la detección del consumo de drogas psicoactivas cumple su propósito, pero al entrenarse con tan pocas muestras, diez sin droga y cinco con T.H.C.,

a la hora de testearlo en otras personas, sujetos de prueba 16, 17, 18, 19 y 20 sin alcohol, otorga falsos positivos que se podrían evitar.

- Con respecto a los resultados en tetrahidrocannabinol, tanto el tiempo de respuesta como la amplitud relativa resultan buenos indicadores de consumo. Mientras que, para el alcohol, el tiempo de respuesta no es un buen indicador debido a que no se observan grandes cambios, no así con la amplitud relativa que resulta un excelente parámetro. La diferencia entre el comportamiento de ambos parámetros y las dos drogas habilita la posibilidad de poder determinar la droga utilizada.

## 10. Discusión y trabajo futuro

Se plantean los siguientes puntos a mejorar en el futuro:

- Es de carácter fundamental aumentar la cantidad de pruebas en sujetos con y sin drogas en sangre. Se deben hacer mediciones en personas bajo el efecto del alcohol en mayores lapsos de tiempo (30 minutos, 60 minutos, 120 minutos y 180 minutos) con el fin de observar el comportamiento de los parámetros analizados. Ampliar el estudio a otras drogas que actúan sobre el sistema nervioso central como benzodiacepinas, opioides, cocaína. Robustecer la base de datos traerá aparejado mejorar la respuesta del modelo utilizado para la determinación de forma fidedigna y disminuir considerablemente los falsos positivos y disminuir los falsos negativos.
- Medir otras variables analizadas en los trabajos “*Pupil function as an indicator for being under the influence of central nervous system-acting substances from a traffic-medicine perspective*”<sup>4</sup> y “*The potential of infrared pupillography in routine police traffic checks*”.<sup>5</sup> Empezando por la latencia.
- Contrastar los resultados del dispositivo con un test de drogas certificado, tanto de alcohol como de marihuana y otras drogas.
- Con respecto a la interfaz gráfica se debe implementar un botón de “*Resultados*” donde se puedan visualizar los resultados de los últimos test.
- Implementar un código que detecte la pupila y modifique automáticamente los parámetros del procesamiento de imágenes, con el fin de poder obtener resultados del test sin importar que el ojo del paciente se encuentre mal posicionado.
- Implementar una detección automática de parpadeo durante el test, el cuál envíe un mensaje por pantalla indicando la necesidad de repetir el test.
- Imprimir carcasa de pantalla que contenga un orificio en la salida HDMI de la Raspberry Pi 4.
- Se debe cambiar y/o mejorar la espuma de Poliuretano la cual sirve de interfaz entre el rostro de la persona y el dispositivo.

- Mejorar y/o cambiar las cintas sujetadoras del dispositivo.
- Aumentar la cantidad de leds tanto los blancos como los infrarrojos.
- Cambiar el módulo de pantalla display de 3.5P por un módulo de pantalla de 5P el cual cubra por completo el área del dispositivo mejorando la experiencia del usuario.
- Se debe mejorar del suministro energético debido a que las baterías con las que cuenta el dispositivo, si bien cumplen el objetivo propuesto, ocupan mucho espacio y otorgan demasiado peso.

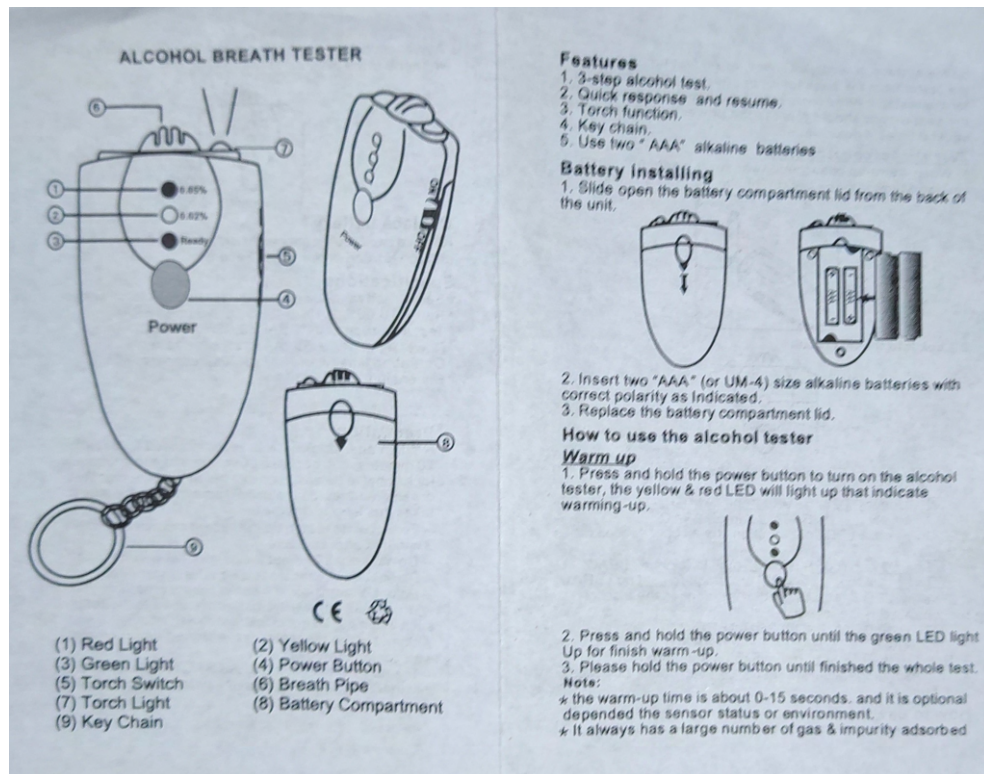
# Apéndice

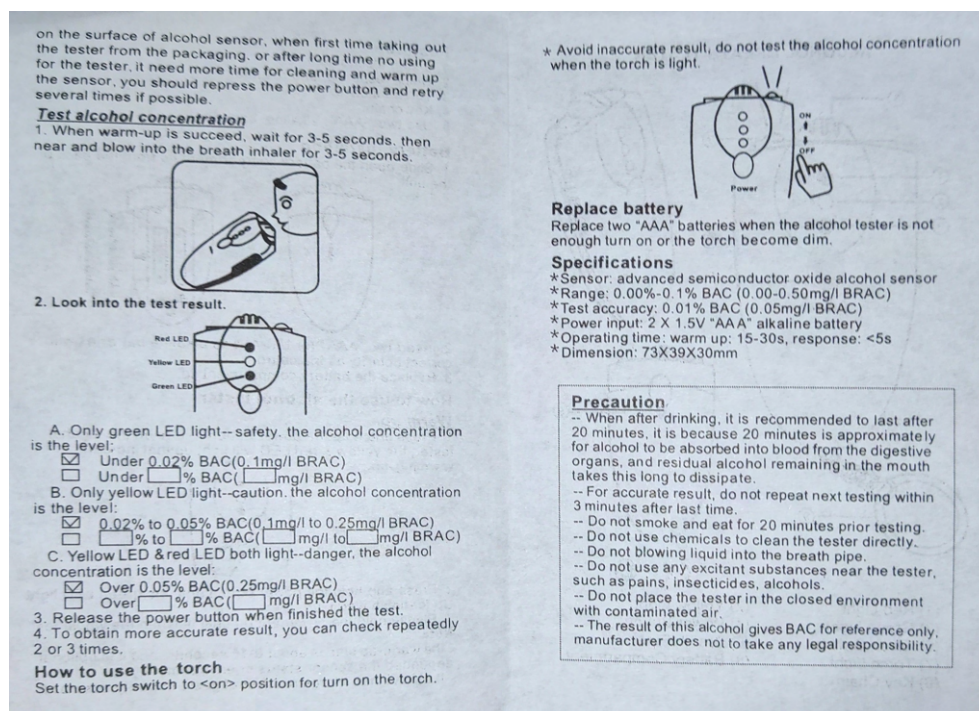




## A. Material suplementario

### A.1. Manual Alcoholímetro





## Referencias

- [1] L. por la Vida Asociación Civil, *SINIESTROS DE TRÁNSITO: TRAGEDIAS COTIDIANAS QUE PUEDEN EVITARSE*, <https://www.luchemos.org.ar/es/accidentes-argentina>, (accedido: 12-Nov-2021).
- [2] C.E.S.V.I., *EN LA CONDUCCIÓN, ERRAR ES HUMANO*, <https://home.cesvi.com.ar/Posts/ViewPost/EnLaConduccionErrorEsHumano>, (accedido: 12-Nov-2021).
- [3] M. E. Keller, J. Azar, N. Liendro, C. Naftal and M. Rada, *Observatorio Nacional Vial*, 2019.
- [4] F. C. Monticelli, F. Priemer, W. Hitzl and T. Keller, *Medicine Science and the Law*.
- [5] F. C. Monticelli, F. Priemer, U. Preiss, S. Kunz and T. Keller, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- [6] P. RojasBañeros, C. Villabona Berrozpe, C. Acero Cuesta, F. García González, J. Martín-Moro González, A. Martínez González, E. Almagro guzmán, Vázquez López, F. Bartolomé Pérez and M. A. Cabau Roca, *Oftalmología. Manual CTO de Medicina y Cirugía*, 2019.
- [7] Gouyton and Hall, *Tratado de Fisiología médica*, 2011.

- [8] C. Kuhn, S. Swartzwelder and W. Wilson, *Colocados: lo que hay que saber sobre drogas más consumidas, desde el alcohol hasta el éxtasis*, 2011.
- [9] <https://www.doctortest.com/test-cocaina-tira-cos>, (accedido: 12-ene-2021).
- [10] <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003578.htm>, (accedido: 12-ene-2021).
- [11] <https://www.dragersolutions.com.ar/detectores-de-alcohol-y-drogas/drugtest-5000/>, (accedido: 12-ene-2021).
- [12] [https://www.draeger.com/es\\_csa/Products/Alcotest-5000](https://www.draeger.com/es_csa/Products/Alcotest-5000), (accedido: 18-ene-2022).
- [13] [https://www.draeger.com/es\\_csa/Products/Alcotest-7510](https://www.draeger.com/es_csa/Products/Alcotest-7510), (accedido: 18-ene-2022).
- [14] <http://lifeloc.com.ar/alcoholimetros/fc20/>, (accedido: 18-ene-2022).
- [15] <https://www.amtech.de/en/products/f2d>, (accedido: 18-ene-2022).
- [16] <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>, (accedido: 23-ene-2022).
- [17] <https://www.raspberrypi.org/documentation/accessories/camera.html>, (accedido: 30-sep-2021).
- [18] <https://tienda.starware.com.ar/producto/pantalla-display-tactil-xpt-raspberry-pi-4-xpt20> (accedido: 15-feb-2022).
- [19] <https://wiki.52pi.com/index.php?title=EP-0118.jpg>, (accedido: 23-ene-2022).
- [20] <http://www.datasheet.es/PDF/656908/ICR18650-22-pdf.html>, (accedido: 23-ene-2022).
- [21] <https://docs.python.org/es/3.7/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [22] <https://docs.opencv.org/4.5.0/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [23] <https://numpy.org/doc/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [24] <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/version/1.0.1/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [25] <https://matplotlib.org/3.1.3/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [26] <https://docs.wxpython.org/4.0.4/index.html>, (accedido: 23-ene-2022).

- [27] <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [28] <https://docs.python.org/3.7/library/time.html>, (accedido: 23-ene-2022).
- [29] <https://gpiozero.readthedocs.io/en/stable/>, (accedido: 23-ene-2022).
- [30] <https://scikit-learn.org/stable/>, (accedido: 3-jun-2022).
- [31] <https://docs.python.org/3/library/threading.html>, (accedido: 04-07-2022).
- [32] [https://docs.opencv.org/4.x/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#gadf1ad6a0b82947fa1fe3c3d497f260e0](https://docs.opencv.org/4.x/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#gadf1ad6a0b82947fa1fe3c3d497f260e0), (accedido: 05-jul-2022).
- [33] [https://docs.opencv.org/4.x/d6/d6e/group\\_\\_imgproc\\_\\_draw.html#ga746c0625f1781f1ffc9056259103edbc](https://docs.opencv.org/4.x/d6/d6e/group__imgproc__draw.html#ga746c0625f1781f1ffc9056259103edbc), (accedido: 22-feb-2022).
- [34] JackSklansky.
- [35] [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga2c759ed9f497d4a618048a2f56dc97f1](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga2c759ed9f497d4a618048a2f56dc97f1), (accedido: 22-may-2022).
- [36] [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga103fcbda2f540f3ef1c042d6a9b35ac7](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga103fcbda2f540f3ef1c042d6a9b35ac7), (accedido: 05-jul-2022).
- [37] [https://docs.opencv.org/4.x/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga8d26483c636be6b35c3ec6335798a47c](https://docs.opencv.org/4.x/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga8d26483c636be6b35c3ec6335798a47c), (accedido: 05-jul-2022).
- [38] [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga556a180f43cab22649c23ada36a8a139](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga556a180f43cab22649c23ada36a8a139), (accedido: 05-jul-2022).
- [39] [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#gaf259efaad93098103d6c27b9e4900ffa](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#gaf259efaad93098103d6c27b9e4900ffa), (accedido: 05-jul-2022).
- [40] <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html>, (accedido: 3-jun-2022).