

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**DSc. Esteban Pino Quiroga**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:

**Ingeniero Civil Biomédico**

Estimación del estado de vigilia, a partir de  
imágenes de video.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
DSc. Esteban Pino Quiroga

# Estimación del estado de vigilia, a partir de imágenes de video



Ricardo Andrés Erices Lagos

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Biomédico

Noviembre 2015

## Resumen

Los accidentes con grandes camiones y maquinaria son particularmente graves por la energía que estos involucran, especialmente en el área minera y forestal. Es por ello que es importante evitar este tipo de accidentes, y uno de los aspectos que lo genera es la fatiga de choferes y operadores. Existen algunas herramientas, pero muchas son incómodas para los conductores ya que requieren de contacto. Una alternativa más cómoda es monitorear por medio de imágenes de video. Estas imágenes permiten calcular parámetros oculares como la frecuencia de pestañeo, la duración de pestañeo y el tiempo total en que los ojos están cerrados en un minuto (AVECLOS).

Se realizó un software con Python y su librería OpenCV que detecta los párpados y su posición por medio de una cámara infrarroja (lo que permite usar iluminación con luces infrarroja, que no afecta los parámetros oculares), con lo que se obtiene la apertura ocular. Junto con el software anterior se utilizó un microcontrolador, para obtener el tiempo de reacción usando un método basado en el test de Osler. Ambos sistemas fueron implementados en laboratorio para obtener datos de 4 sujetos. Posterior a la medición se realizó un análisis por medio de Matlab, para a partir de la apertura ocular, obtener los parámetros oculares a comparar. Para la asociación entre el tiempo de reacción y cada uno de los parámetros oculares obtenidos se usó el cálculo de correlación. Además se evaluó el comportamiento que presentaba AVECLOS para valores atípicos del tiempo de reacción., para ello se consideró la media más dos desviaciones estándar de esta variable, siendo 488 ms y 431 ms para mujeres y hombres respectivamente.

Se obtuvo datos dispares en la correlación del tiempo de reacción respecto a la duración y frecuencia de pestañeo. Entre el tiempo de reacción y AVECLOS fue diferente, la correlación más baja fue de 0,771, con lo que se aceptó existía un grado importante de relación lineal directa entre ambas variables. Esto permite asociar el tiempo total en que los ojos permanecen cerrados en un minuto con el estado de vigilia. Al evaluar el comportamiento que poseía la variable AVECLOS, para valores elevados del tiempo de reacción (mayor a 488 ms y 431 ms para mujeres y hombres respectivamente), se observó que durante los periodos de tiempo de reacción elevados, el valor mínimo de AVECLOS supera a los demás valores de AVECLOS en los periodos de tiempo de reacción normales. Se obtuvo finalmente un umbral de AVECLOS de 0,18, el cual permitiría deducir un estado de vigilia disminuido, pero debe ser evaluado con mayor número de mediciones.



No puedes controlar el viento, pero sí puedes ajustar las velas.

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios y a mi familia, a mis padres a quienes amo, que hicieron esto posible con su constante apoyo en todo ámbito, especialmente en los momentos más difíciles; a mi hermano que siempre ha sido fundamental en mi vida, a toda mi familia ya que cada uno en su forma tiene un lugar especial para mí, a mis amigos, y finalmente a Javiera Arriagada quien siempre será importante para mí además de ser la madre de quien es la persona más valiosa en mi vida, mi hijo Martín Erices Arriagada, a quien va dirigido este trabajo.

A mis profesores que a lo largo de mi vida aportaron con un importante granito de arena para hoy cumplir esta meta, especialmente en esta última etapa a mi profesor guía y jefe de carrera Dr. Esteban Pino y el resto de mi comisión.

Quiero agradecer también a quienes hicieron más fácil estar lejos de casa, con quienes viví en estos años de estudio, Daniel, Carlita, mi primo Ian y Diego, especialmente a Camila y mi primo Gonzalo, que junto con su amiga Claudia hicieron menos complejo mi regreso a Concepción luego de vivir los momentos más difíciles de mi vida.

Además agradezco a mis amigos Ale, Vale, Javier, Migue y Pollo, amistades que se generaron y fortalecieron a lo largo de estos 7 años, con quienes aprendimos a disfrutar nuestras experiencias, acompañarnos en las dificultades y sobrellevar las diferencias. Espero mantengamos siempre esa amistad. Y a quienes hicieron más ameno las muchas veces largas jornadas en el laboratorio, Britam, Kique y Don Ale.

Finalmente a la comunidad universitaria Udec y Biomédica, con quienes viví una etapa que jamás olvidaré.

# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABREVIACIONES .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	2
2.2. TRABAJOS PREVIOS .....	2
2.2.1 <i>El sueño y la conducción</i> .....	2
2.2.2 <i>Revisión de tecnologías de detección de fatiga de conductores</i> .....	6
2.3. DISCUSIÓN .....	12
<b>3. PROPUESTA DE SISTEMA DE MONITOREO DE LA VIGILIA.....</b>	<b>14</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	14
3.2. OBJETIVOS .....	16
3.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	16
3.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	16
3.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	16
3.4. METODOLOGÍA .....	17
3.4.1 <i>Luz infrarroja</i> .....	17
3.4.2 <i>Test de OSLER</i> .....	19
3.4.3 <i>Consideraciones para realizar mediciones</i> .....	20
<b>4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>22</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	22
4.2. HARDWARE.....	22
4.2.1 <i>Cámara</i> .....	22
4.2.2 <i>Test de Osler</i> .....	23
4.2.3 <i>Sistema completo de adquisición de datos</i> .....	25
4.3. SOFTWARE .....	27
4.3.1 <i>Algoritmo de medición de apertura ocular (Python)</i> .....	27
4.3.2 <i>Algoritmo de definición de parámetros oculares (Matlab)</i> .....	36
4.3.3 <i>Algoritmo para la validación de la detección de parámetros oculares. (Matlab)</i> .....	39
4.3.4 <i>Algoritmo test de OSLER. (Arduino)</i> .....	42
<b>5. ANÁLISIS DE PARÁMETROS OCULARES RESPECTO A LA VIGILIA.....</b>	<b>44</b>
5.1. APLICACIÓN DE CRITERIO DE CORRELACIÓN .....	44
5.2. AVECLOS PARA TIEMPOS DE REACCIÓN ANORMALES .....	46
5.3. PROPUESTA DE DETECCIÓN DE SOMNOLENCIA A PARTIR DE AVECLOS.....	50
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	52
6.2. TRABAJO FUTURO.....	52
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A. FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO .....</b>	<b>48</b>

## Lista de Tablas

Tabla 1: : Accidentes provocados por cansancio o sueño, respecto al total (año 2012). .....	3
Tabla 2: Especificaciones técnicas de la cámara utilizada. ....	22
Tabla 3: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de los tiempos entre frames que se obtienen tras la aplicación de los algoritmos para definir la posición de los ojos. ....	31
Tabla 4: Resultado del conteo de marcas de pestaños versus los encontrados por el algoritmo para la validación del mismo. ....	40
Tabla 5: del cálculo de correlación entre el tiempo de reacción y los parámetros oculares. ....	45
Tabla 6: Media, desviación estándar, y limite superior e inferior del tiempo de reacción para el 96 % de la población. ....	47
Tabla 7: Se muestra el valor atípico de tiempo de reacción para cada sujeto según su género y el valor mínimo en el vector de AVECLOS donde el tiempo de reacción es mayor al umbral. ....	50



## Lista de Figuras

Fig. 1 Distribución de micro sueños de acuerdo a su duración [7].	5
Fig. 2 Se observa el dispositivo "Engine Driver/Driver Vigilance Telemetric Control System", a la derecha se observa el reloj donde se encuentran los electrodos [5].	8
Fig. 3 Pantalla del control de los parámetros hechos por "Seeing Machine's Fatigue Monitoring System". [16].	10
Fig. 4 Accidente causado por una mala maniobra del operador. El 15 de Junio del 2012, en Algarrobito. [19].	13
Fig. 5 Grafico de la estimación del ingreso promedio de camiones a los puertos del país en el año 2012 .[2]	14
Fig. 6 Grafico de déficit y superávit estimado en condición de economía normal, recesión y en un aumento de fiscalización, para el 2011 y una estimación para el 2016. [2].	15
Fig. 7 Partes externas del ojo. Donde para este trabajo se destacan los parpados, dado que su posición nos permite determinar la apertura ocular. [20].	17
Fig. 8 Partes internas del ojo. Donde para este trabajo se destacan los parpados, dado que su posición nos permite determinar la apertura ocular. [21].	18
Fig. 9 Espectro electromagnético, donde se destaca el espectro visible [22].	18
Fig. 10 Cámara utilizada, marca: pctrnix modelo: wc-19-sn325.	23
Fig. 11 Diagrama de conexión de microcontrolador, donde ambos led (rojo y verde) comparten tierra, y cada uno se alimenta de su propio pin configurado como salida. Se observa además la conexión del pulsador en el pin 2 configurado como entrada, donde se agrega una resistencia de alto valor (1 M ohm) para evitar el ruido cuando el pulsador no está presionado.	24
Fig. 12 Diagrama de posicionamiento de la cámara (objeto azul) y de los focos (objetos rojos). El foco superior se posiciona respecto a la cámara, la cual se ubica a la altura del centro del rostro del sujeto. El foco inferior se ubica a 20 cm por sobre la altura de la silla, y debe disponerse en dirección del rostro, con ángulo variable, debido a que dependerá de la altura del sujeto de prueba la posición de su cara.	25
Fig. 13 Elementos requeridos para la adquisición de datos. a)Fuente de luz infrarroja. b) Cámara infrarroja. c) Fuente de luz infrarroja. d) Luces Led (roja y verde). e) Computador con los software necesarios. f) Supervisor. g) Sujeto de prueba. h) Microcontrolador Arduino. i) Pulsador.	26
Fig. 14 Rectángulos en blanco y negro con los que el algoritmo de detección de rostros por Haar Cascades calcula las características diferenciadoras entre imágenes positivas (rostros) y negativas (no rostros) [24]. b) Ejemplo de funcionamiento de algoritmo de detección de rostros.	28
Fig. 15 Se observan los resultados de la detección de ojos (cuadros azules) dentro del área de rostro (cuadros verdes) para cada sistema de entrenamiento. a)"haarcascade_eye": Se muestran como falsos positivos las fosas nasales, y los bordes de los labios. b)"haarcascade_eye_tree_eyeglasses": El borde derecho del labio es detectado como ojo. c)"haarcascade_lefteye_2splits": Para este caso se presentan dos falsos positivos, el borde izquierdo del labio y el ojo derecho, puesto que solo debería detectar el izquierdo. d)"haarcascade_righteye_2splits": Este sistema está entrenado para la detección del ojo derecho, por lo tanto la detección del ojo izquierdo es un error al igual que el de la boca.	29
Fig. 16 Se observa que el algoritmo detecta los ojos abiertos (a) y cerrados (b), teniendo problemas de detección de falsos positivos de la misma forma en ambos casos.	29

Fig. 17 "A" corresponde al ancho de la cara, mientras que "B" es el ancho del área ocular seleccionada. La mitad del ancho de los ojos se encuentran en las líneas del primer y último cuarto del ancho ocular (X e Y respectivamente). .....	30
Fig. 18 Rostro dividido en 3 partes de igual largo, partiendo en el mentón hasta la base de la nariz, de ahí hasta la zona media de las cejas para terminar en la línea de implantación del pelo[28].....	30
Fig. 19 Vectores de tiempo para el tiempo entre frames para la detección de ojos en el área facial por haarcascade(verde) y establecidos por literatura(negro) con sus respectivos promedios. ....	31
Fig. 20 Pasos de la aislación de la zona de los ojos. a) Se muestra un ejemplo de rostro con área ocular definida. b) Imagen umbralizada. c) Zona ocular extraída de la imagen umbralizada. d) Detección de bordes a zona ocular. ....	32
Fig. 21 Tipos de relaciones de vecindad entre pixeles vecinos a) Vecindad 4: vecinos horizontales y verticales. b) vecinos diagonales. ....	33
Fig. 22 Grafica de vector de distancia entre punto máximo del parpado superior y el punto mínimo del parpado inferior. Se encuentran marcados los eventos de pestañeo (a), e igualmente el instante donde los ojos permanecen cerrados (b). ....	35
Fig. 23 Plataforma interactiva principal a) Con este botón se llama a la siguiente ventana(ventana de guardado), se comienza la calibración y activa el botón comenzar captura. b) Al apretar este botón, se marca el momento de comienzo de guardado de datos. c) Con este Slider se puede modificar el valor de umbralización de la imagen. d) Vuelve al valor por defecto del umbral(150). e) Se detiene la captura y se guardan los datos. f) Botón que se agregó para la validación del algoritmo.....	35
Fig. 24 Resultado que se busca obtener al realizar la calibración.....	36
Fig. 25 Plataforma interactiva de guardado, aquí se agrega el nombre final del archivo. ....	36
Fig. 26 Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición en Python.....	37
Fig. 27 Sección de vector de apertura ocular. a) Flanco de bajada que se reconoce como un cierre ocular (inicio de pestañeo). b) Flanco de subida que se reconoce como apertura ocular (fin del pestañeo). c) Diferencia entre valor máximo y mínimo que se evalúa para la detección de apertura y cierre de los ojos.....	38
Fig. 28 Sección de la medición de apertura ocular del ojo izquierdo, donde se muestra el resultado del algoritmo de detección de pestañeos versus las marcas realizadas. Se señalan por medio de las flechas los FP arrojados. Se observó que esta señal arroja pocas y breves zonas con estos ruidos. ...	40
Fig. 29 Sección de la medición de apertura ocular del ojo derecho, donde se muestra el resultado del algoritmo de detección de pestañeos versus las marcas realizadas. Se señalan por medio de las flechas los FP arrojados. Se observó que esta señal a diferencia de la del ojo izquierdo arroja mayor cantidad de zonas y más extensas con estos ruidos.....	41
Fig. 30 Diagrama de flujo de algoritmo de test de Osler (Arduino). ....	43
Fig. 31 a) Gráfica de relación entre AVECLOS y duración de pestañeo. b) Gráfica de relación entre AVECLOS y frecuencia de pestañeo. ....	45
Fig. 32 Grafica de relación entre AVECLOS y tiempo de reacción, con la recta resultante de la regresión según correlación. a) Sujeto 1. b) Sujeto 2. c) Sujeto 3. d) Sujeto 4. ....	46
Fig. 33 Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 1, este sujeto es de sexo femenino, por lo tanto el umbral de valores atípicos en el tiempo de reacción se ubica en los 488 ms. Se aprecia que el sujeto desde el comienzo de la medición presenta un estado de vigilia disminuido. ....	47
Fig. 34 Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 2 . Se observa que el sujeto nunca superó el umbral de tiempo de reacción atípico. El vector de de la variable AVECLOS se mantiene por debajo de 0,15. ....	48

Fig. 35 Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 3 . Se observa que una vez superado el umbral en tiempo de reacción, en AVECLOS se presenta también un aumento sin volver a valores previos a la superación del umbral..... 49

Fig. 36 Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 4. Se observa que solo al final se supera el umbral en tiempo de reacción, aumento rápido que se tiene también en AVECLOS.... 49

Fig. 37 Resultado de la aplicación de un umbral de AVECLOS tentativo para la detección de fatiga en los 4 sujetos ..... 51



# Abreviaciones

## Mayúsculas

AVECLOS	: Razón del tiempo con los ojos cerrados en un minuto.
CPAP	: Presión positiva continua en la vía aérea (Continuous positive airway pressure)
IR	: Infrarrojo.
OSAHS	: Síndrome de Apnea Hipopnea Obstructiva de Sueño. (Ingles)
OSAS	: Síndrome de Apnea Obstructiva del sueño. (Ingles)
OSLER	: Oxford Sleep Resistence (test).
PERCLOS	: Porcentaje del cierre del ojo.
TRC	: Tiempo de reacción complejo.
TRS	: Tiempo de reacción simple.



# 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción

El buen descanso tiene importancia en nuestro desempeño diario. En un contexto de alta competitividad es relevante, para una buena productividad, un óptimo estado de vigilia.

Todo lo anterior es aún más importante si no es sólo nuestro desempeño el que se pone en evaluación. Un ejemplo de esto es el rubro del transporte, donde solo en Chile en el año 2012 se registraron 1040 accidentes de tránsito, asociados al cansancio o sueño del conductor [1].

Por las características geográficas de nuestro país, la principal forma de transporte de recursos se realiza por la carretera principal. En estadísticas dadas por el Ministerio de transporte y telecomunicaciones de Chile, hay en promedio una circulación diaria de 5820 de estos camiones por los puertos a lo largo del país [2]. Dos rubros importantes en nuestro territorio es la minería [3] y el área forestal [4], que igualmente usan grandes medios de transporte y maquinaria pesada, donde accidentes provocados por la somnolencia pueden tener grandes consecuencias económicas e incluso involucrar el costo de vidas humanas.

Es por lo expuesto que reconocer el problema de la somnolencia en los conductores y darle una solución es tan importante. El presente trabajo busca precisamente aportar con el camino para encontrar el mejor reparo posible.

## **2. Revisión Bibliográfica**

---

### **2.1. Introducción**

El problema del sueño y el cansancio presente en los conductores provocan accidentes de tránsito de forma constante, así lo demuestra el informe anual de carabineros, en conjunto con el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) [1] y el estudio hecho por Caterpillar con el nombre de "Operator fatigue detection technology review" [5], en Chile y el mundo respectivamente. Para explicar lo anterior es que se han realizado estudios que muestran cómo se ve afectado el desempeño en la conducción en quienes presentan alguna alteración en su estado de vigilia, por ejemplo el estudio denominado "Driver fatigue and highway driving: A simulator study" [6] que traduce la fatiga en tiempo de reacción, o el realizado en University of Iowa, "Variability of driving performance during microsleeps" [7], donde se evalúa la capacidad del conductor de mantener el auto en línea con respecto a la carretera en episodios de micro sueños (episodios donde el ritmo base del cerebro desciende), junto con otros estudios que se expondrán en este trabajo.

Con el fin de evitar las consecuencias de la fatiga en la conducción, se han llevado a cabo algunas alternativas. Parte de estos desarrollos se encuentran en proceso de prueba, por ser un área a mejorar para la ingeniería. Caterpillar en el año 2008 presentó una revisión y resumen de estas tecnologías, donde se muestran los diferentes principios de funcionamiento, sus fortalezas y debilidades, las cuales se estudiarán para observar cómo hacer el mejor aporte al respecto.

### **2.2. Trabajos previos**

La primera parte de la revisión bibliográfica está dirigida a observar qué y cómo varía las condiciones de conducción con la somnolencia y fatiga.

En una segunda parte se presentarán las soluciones existentes en el mercado y las que están en proceso de estudio y/o prueba, la tecnología genérica de cada una, sus fortalezas, como también las limitaciones y dificultades que presentan.

#### **2.2.1 El sueño y la conducción**

En una primera instancia es importante reconocer el problema, y ser consciente de las consecuencias que este tiene. A nivel internacional, en un estudio realizado por Caterpillar publicado el año 2008, se muestra que la somnolencia de los conductores es un factor significativo

en los accidentes que involucran a camiones comerciales. Representando 1200 muertes y 76000 lesiones al año, con un costo de \$12,4 miles de millones de dólares para la industria del camionaje comercial. El 93% de los accidentes por transporte en camiones son causados por errores humanos, y entre un 60 y un 70% de estos errores humanos están relacionados con la fatiga del conductor [5].

Chile no está ajeno a esta problemática, lo que queda en evidencia en el informe anual de Carabineros de Chile sobre los accidentes y accidentados de tránsito en el año 2012, según tipo de accidente, causa del mismo, localidad, tipo de vehículo, entre otros. Los datos muestran, tal y como se muestra en la Tabla 1, que hay un total de 61.791 accidentes de los que 520 se debieron al cansancio o sueño del conductor (0.841%), de los cuales 109 corresponden a colisión (participan al menos dos vehículos en movimiento), 200 a choques (un vehículo impacta con un objeto fijo o a un vehículo estacionado o detenido) y 191 a volcaduras. En el último caso, el sueño es causal del 5.374% del total de volcaduras [1]. Lo anterior debido a que los conductores fatigados usualmente no notan su condición, conduciendo entre 3-30 segundos con los ojos cerrados [5].

La somnolencia en los conductores, se puede explicar por la monotonía de la tarea, como también por un mal descanso, o incluso con la personalidad. La larga duración de la conducción en autopistas y carreteras, es una causa importante de los accidentes relacionados con la fatiga. Este agotamiento afecta gravemente el estado de alerta del conductor y su rendimiento, poniendo en peligro al transportista. En un estudio denominado "Driver fatigue and highway driving: A simulator study" [6], llevado a cabo por el departamento de ingeniería mecánica de la National Central University en conjunto con el departamento de diseño industrial de Tatung University, se mide cuantitativamente la progresión de la fatiga del conductor midiendo el tiempo de reacción. Se analizaron treinta sujetos varones jóvenes durante 90 minutos de conducción en carretera de laboratorio simulado. Donde los resultados arrojaron que el tiempo límite de seguridad de conducción es de 80 minutos, ya que se vio que posterior a este tiempo, durante el último periodo de 10 minutos de la sesión de 90, la media del tiempo de reacción fue de 0.31 segundos más que aquellos en el primer período de sesiones de 90 minutos, lo que para una conducción a 100

**Tabla 1: Accidentes provocados por cansancio o sueño, respecto al total (año 2012).**

	Total	Atropello	Caída	Colisión	Choque	Volcadura	Otros
Conducir condiciones físicas deficientes (cansancio, sueño)	520	9	3	109	200	191	8
Total año 2012	61.791	5225	1813	31800	15033	3554	1366

Km/h (límite aproximado de velocidad en carreteras) se traduce en un adicional de poco más de 8 m en la distancia de frenado [6]. Por lo tanto ante largas jornadas de conducción, se ve disminuido el desempeño del operario, aumentando su tiempo de reacción y con esto los riesgos de accidente del tránsito.

La somnolencia en conductores y operadores se ve aumentada con el poco o mal descanso. Así queda en evidencia en un estudio llamado " Fatigue, sleep restriction and driving performance ", realizado en Université Bordeaux II, en Julio del 2004, en este trabajo se realizaron pruebas con 22 sujetos, en un laboratorio y una carretera abierta de Francia. La conducción fue de 1000 Km, en 5 sesiones de 105 min. Se comparó el tiempo de reacción y el total de cruces de línea antes y después de una obligada privación de sueño. Los resultados arrojaron que posterior a la restricción de sueños se aumentó de 66 a un promedio de 535 cruces. Esto debido al aumento en el tiempo de respuesta que genera la fatiga y la somnolencia. Se puede apreciar que el tiempo de los intervalos de conducción (105 min) es pequeño, pero que aun así, por estar privados de sueño, el desempeño de conducción se ve alterado [8].

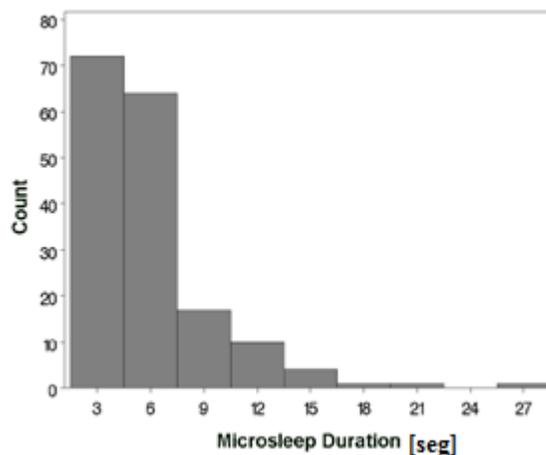
A lo anterior se suma el trabajo "Variability of driving performance during microsleeps" de la University of Iowa, el que se llevó a cabo con sujetos diagnosticados con el síndrome de apnea e hipoapnea obstructiva del sueño (OSAHS, por sus siglas en inglés). El síndrome de apnea e hipoapnea obstructiva del sueño, es de los desordenes más comunes del sueño, y está asociado con problemas de salud [9]. La apnea obstructiva del sueño se caracteriza por un cesar momentáneo en la respiración (apnea) o una reducción significativa en la amplitud de la misma (hipoapnea) causado por una obstrucción o colapso en las vías respiratorias superiores. Tanto la apnea como la hipoapnea pueden causar hipoxemia (bajo nivel de oxígeno en la sangre) e hipercapnia (aumento de la presión de CO<sub>2</sub> por sobre el límite superior normal de 45 mmHg), además la obstrucción en las vías aéreas incrementa la resistencia al flujo de aire resultando en un mayor esfuerzo para respirar y cambios en la presión intratorácica, generando la interrupción del sueño [10]. Estudios demuestran que la tasa de pacientes con OSAHS está directamente relacionada con la edad [11], alterando la calidad de las personas tanto en sus emociones y relaciones interpersonales como en las limitaciones en sus actividades, no sólo asociado a la excesiva somnolencia durante el día [12]. Así entonces los sujetos escogidos para llevar a cabo el estudio de la University of Iowa, fueron pacientes diagnosticados con OSAHS, ya que estos presentan mayor cantidad de eventos de microsueños, para esto un microsueño fue considerado un episodio de 3 a 14 segundos de duración donde el ritmo base de la actividad cerebral desciende de 8-13 (alpha) a 4-7 Hz (theta) medido por un electroencefalograma.

Los sujetos fueron probados en un simulador de conducción, con un trayecto monótono para inducir el agotamiento, y se les midió la variación del vehículo con la línea de la carretera, variación de la dirección (ángulo del volante) y el tiempo que tardaban en cambiarse de carril, en forma offline; estos parámetros fueron evaluados, 3 segundos antes hasta 3 segundos después de cada episodio de microsueño.

De las pruebas se observó que los eventos de microsueños más repetidos son los que tienen menor duración (Figura 1). Además que los parámetros variaron como sigue: Tanto la variación con respecto a la línea de la carretera como la variación de la dirección fueron mayores durante los episodios, siendo más notorio en ambos casos cuando coincidían con una curva en el camino, volviendo a valores similares a los iniciales al terminar el evento, mientras que el tiempo de cambio de carril disminuía durante los episodios, lo cual se asocia con una acción de menos cuidado [7].

La conclusión de un mal descanso como causante de un aumento de somnolencia y como tal un factor de riesgo en la conducción, se ve respaldado con un estudio realizado en dos hospitales de la ciudad de Santander de España. El promedio de edad de los participantes fue de 44 años y el 77% de ellos eran hombres, en este estudio se concluyó que quienes sufrían de OSAHS tenían una mayor probabilidad de sufrir accidentes de tránsito [13].

Finalmente la somnolencia en conductores tiene por factor sus características personales, sobre todo en condiciones monótonas. Esto es lo que intenta demostrar un trabajo realizado por la Université de Montréal, en Canadá. Las características estudiadas fueron la extraversión, la búsqueda de sensaciones y la dependencia de campo; las cuales se explican a continuación:



**Fig. 1 Distribución de micro sueños de acuerdo a su duración [7].**

La extroversión es la característica de la personalidad más estudiada en la literatura de la vigilia. Ya que se asocia con una fatiga subjetiva, cuando se trata de realizar tareas monótonas, como es el caso de la conducción en carretera. La teoría dice que la gente extrovertida sufre efectos negativos en el rendimiento de la conducción, cuando se trata de caminos regulares.

La búsqueda de sensaciones es un rasgo de la personalidad que se caracteriza por la necesidad de tener variadas, novedosas y complejas experiencias y sensaciones, junto con la voluntad de asumir riesgos físicos y sociales en aras de estas experiencias, durante la conducción.

La dependencia de campo se refiere a la incapacidad de percibir un elemento como algo separado de un contexto y de realizar una tarea de resolución de problemas espaciales de una forma analítica. Los independientes de campo, pueden reconocer más fácilmente un elemento independiente que emerge de un campo estructural.

Cada participante realizó 5 cuestionarios para definir sus características personales, y el desempeño de la conducción se evalúa respecto a la desviación estándar del movimiento de la dirección de las ruedas.

De acuerdo a los resultados, los conductores con personalidades de alta búsqueda de sensaciones y extrovertidos pueden ser más sensibles a la monotonía en la carretera y por lo tanto más propensos a los errores de conducción relacionados con la fatiga en entornos viales poco exigentes. La identificación de estas características de la personalidad pueden servir de valiosa información práctica, para por ejemplo definir los destinos y rutas más idóneas para cada conductor [14].

Hasta ahora se trataron las pruebas que evidencian las repercusiones que tiene la somnolencia en la conducción. Riesgos que se acrecientan con la propia monotonía de la tarea, la falta de un buen descanso o incluso con la personalidad que caracteriza a cada conductor. Atendiendo a lo anterior se han presentado diferentes tecnologías, las cuales se presentaran a continuación.

### **2.2.2 Revisión de tecnologías de detección de fatiga de conductores**

Entre los principios genéricos de detección de la fatiga, de la tecnología disponible, podemos encontrar: Desviación respecto a la línea, detección de cabeceos, cálculo del tiempo de reacción, análisis del tono muscular, detección de pestañeo, conductancia de la piel, monitoreo de las características oculares, entre otras.

Caterpillar realizó una revisión de las tecnologías existentes que buscan combatir la

somnolencia en la conducción, entre las que se encuentran las siguientes:

*Pro-Active Fatigue Management System (ARRB)*: EL dispositivo ARRB mide los niveles de estado de alerta del operador a través de la reacción del operador a un estímulo visual y audible. Esto se hace en tiempo real y de forma continua mientras se encuentre en la tarea de conducir. Tiene la capacidad reconocer las reducciones en los niveles de alerta y permite una estrategia de intervención para contrarrestar los efectos de conducir fatigado. En circunstancias normales, el dispositivo presenta un estímulo de luz y sonido a intervalos entre 7 y 10 minutos, tiempo que depende de las reacciones medidas, entre más lentas sean estas menor será el tiempo entre pruebas. Cuando se dan reacciones extremadamente lentas, el dispositivo dispara una alarma en cabina. ARRB tenía buenos comentarios con respecto a la capacidad del operador para detectar la fatiga, pero para muchos se convirtió rápidamente molesto con las pruebas constantes [5].

*ASTID™(PERNIX LTD)*: El dispositivo ha recibido comentarios positivos de los ensayos realizados en dos minas, donde se entrevistó con los operadores. El sistema utiliza un software que podría predecir los niveles de fatiga según la hora del día, reloj circadiano, y la cantidad y calidad del sueño del operador, y también el seguimiento de los movimientos del volante. El sistema puede ser configurado para requerir como entrada la calidad del sueño previa de los usuarios o bien se puede configurar para asumir diferentes niveles predeterminados de la calidad del sueño. Los operadores consideraron que en su mayor parte, el sistema era congruente con el cómo se sentían. Aunque algunos operadores experimentaron alarmas cuando no sentían sueño en absoluto. Esto se dio en gran medida cuando los conductores no informaban antecedentes de su descanso [5].

*Engine Driver/Driver Vigilance Telemetric Control System(EDVTCS/DVTCS)*: El sistema mide la actividad eléctrica de la dermis por medio de un sensor en un reloj de pulsera (Figura 2). El dispositivo emite una señal audible y visual decenas de segundos antes de una disminución crítica del nivel de alerta.

Algunos usuarios consideran incómodo el equipo, debido a que no les gusta usar reloj de pulsera; y presentaba el requerimiento de que el conductor debía verse en la obligación de asegurar que los electrodos del reloj hicieran buen contacto con la piel [5].



**Fig. 2** Se observa el dispositivo "Engine Driver/Driver Vigilance Telemetric Control System", a la derecha se observa el reloj donde se encuentran los electrodos [5].

NOVAlert: Predice el estado de vigilia de acuerdo al tono muscular medido por electromiografía. Al igual que el dispositivo anterior lo hace por medio de electrodos puesto en un reloj de pulsera. Cuando la actividad muscular disminuye por debajo de un nivel establecido emite un estímulo vibratorio en la muñeca, el cual se repite cada 10 segundos si no se obtiene una respuesta correcta. El dispositivo necesita ser calibrado para cada individuo antes de cada uso para determinar la línea base de tono muscular que indicará somnolencia (la calibración tarda menos de 5 minutos). Es posible transmitir el estado del conductor a una base de datos a distancia [5].

AutoVue: Por medio de una cámara evalúa la desviación respecto a la línea del camino. Cuando ocurre un cambio de carril, emite una alarma sonora para que el operador pueda corregir el evento. A pesar de ser ampliamente aceptado en la industria del transporte, el sistema es sensible al clima y a las condiciones del camino, como la reflexión de la luz, nieve cubriendo la carretera, etc.

Además para poder ser útil en el área de la minería o forestal, donde muchas veces no existen caminos marcados, necesitaría importantes cambios [5].

NapZapper: Es un pequeño dispositivo que se pone alrededor de la oreja del conductor, el cual al inclinar la cabeza en un cierto ángulo (cabecear), el mercurio que contiene dentro, cierra un interruptor interno, emitiendo una señal audible.

El dispositivo cuenta con un interruptor el que tiene que estar encendido para que el dispositivo sea funcional, por lo que es posible que el operario tenga puesto el dispositivo pero se encuentre apagado. Algunas minas donde se usa el dispositivo declararon que no hubo accidentes relacionados con la fatiga desde la aplicación. Pero en otra mina se indicó que el dispositivo es delicado y se debe utilizar y llevar con cuidado, el mecanismo debe vigilarse periódicamente para asegurarse de que está funcionando.

Por necesitar el contacto con el operador, este al sentir molestias podría sencillamente retirarse el dispositivo, anulando su funcionalidad [5].

*Sensor de hemoglobina (Fujitsu):* La firma nipona Fujitsu ha desarrollado un dispositivo que contiene un sensor que se coloca en el lóbulo de la oreja y mide la cantidad de hemoglobina que fluye en los vasos sanguíneos determinando así el ritmo cardíaco. Los datos recogidos por el sensor son enviados a un smartphone por medio de conexión inalámbrica, estos se encargan de procesar la información y alertar con mensajes de voz o vibraciones al conductor. Pruebas realizadas por la marca arrojaron un porcentaje de éxito entre el 70% y el 80% [15].

Un problema compartido con alternativas mencionadas anteriormente, es que requieren del contacto con el conductor, generando molestias en su uso.

*Driver Fatigue Monitor:* Este fue el primer dispositivo disponible en el mercado para calcular automáticamente el porcentaje de cierre de los ojos (PERCLOS) por medio de una cámara, lo que explica su popularidad entre investigadores del transporte. Los ensayos en terreno en el transporte por carretera, ferrocarril y la industria minera mostraron siempre como importante desventaja demasiada sensibilidad a movimientos de cabeza del operador, desalineamientos de la cámara y a las condiciones de iluminación. Las opiniones de los operadores son en su mayoría negativas, acusando altas tasas de falsas alarmas. Otras tecnologías han perfeccionado la detección automatizada de PERCLOS y no sufren de las mismas limitaciones [5].

*Driver State Monitor:* El sistema utiliza una cámara infrarroja para junto con un algoritmo de reconocimiento de rasgos faciales evaluar a tiempo real la fatiga y distracción visual del conductor. Al identificar la fatiga emite una señal sonora y visual. Es un sistema robusto a las condiciones de luz y uso de gafas tradicionales. Este dispositivo a diferencia del resto de las tecnologías presentadas posee la ventaja de que además de la fatiga puede evaluar la distracción. Por ser un sistema remoto no necesita contacto directo con el operador, lo que es otro punto importante a su favor.

En este sistema se buscaba funcionalidad en todas las condiciones de iluminación, así como establecer la tolerancia de movimiento de la cabeza para considerarlo distracción. Esto último le da una ventaja añadida, el detectar tanto la fatiga y distracción del conductor por sí solo [5].

FaceLab: Por medio de una cámara de video infrarroja, estima la posición de la cabeza del conductor, las condiciones de los ojos y la facial, incluyendo porcentaje de cierre de los ojos. La detección de la fatiga se logra basado en la revelación de microsueños.

El sistema consigue un buen desempeño en un entorno de laboratorio. Mientras que las pruebas en campo se iniciaron en EEUU, y en Australia con el fin de realizar pruebas en minas [5].

Así también la BBC expuso el 10 de Diciembre del 2013, en un publicación llamada "¿Cómo evitar que los conductores se queden dormidos al volante?", un nuevo dispositivo de detección de fatiga llamado "Seeing Machine's Fatigue Monitoring System", de la empresa Seeing Machine (creadora también del dispositivo FaceLab mencionado anteriormente), el cual a la fecha de publicación del artículo, se comenzaba el periodo de prueba en cinco empresas de autobuses en toda Europa. Durante 9 meses, por medio de cámaras, se monitoreó el movimiento y parpadeo de los ojos, junto con un seguimiento en el movimiento de la cabeza (Figura 3).

La forma en que la tecnología funciona, es que se identifica si se gira la cabeza más allá de un cierto ángulo durante un tiempo si viaja a cierta velocidad, emitiendo una alarma para aludir a retomar la atención en la tarea empleada. La fatiga es evaluada en función de la frecuencia de parpadeo, velocidad y duración de cierre y apertura de los ojos, para determinar si es un microsueño [16].

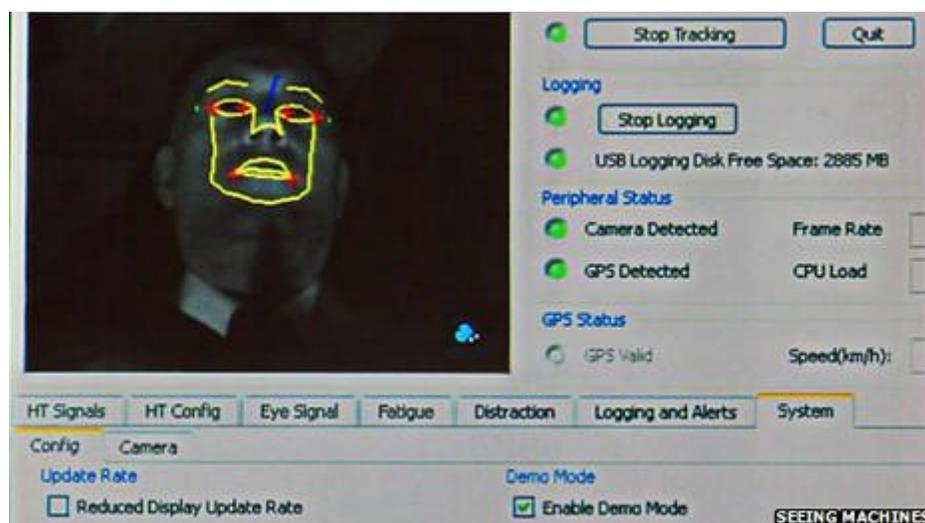


Fig. 3 Pantalla del control de los parámetros hechos por "Seeing Machine's Fatigue Monitoring System". [16]

Los dispositivos basados en parámetros oculares como PERCLOS, duración de los pestaños y el tiempo entre los mismos pueden deber su aceptación anteriormente al ser de naturaleza No invasiva, al no requerir siquiera contacto con el operador. Esta tecnología respalda su funcionamiento en la asociación existente entre los parámetros oculares con la latencia del sueño y el desempeño en la conducción. Un estudio realizado en la University of Helsinki de Finlandia en Abril de 1999, se centró en la duración de el parpadeo como un indicador de somnolencia en la conducción en carretera. Se experimentó con un grupo de personas diagnosticadas con síndrome de apnea obstructiva del sueño (OSAS) y un grupo control que no padece de OSAS. Los parámetros medidos fueron la frecuencia de parpadeo, duración del mismo, control de velocidad y la latencia del sueño. Ambos grupos fueron puestos en tratamiento para el OSAS por medio del CPAP (sistema continuo de presión positiva), que es un sistema de apoyo respiratorio durante el sueño, y se repiten las pruebas posterior a 9 semanas. El CPAP es un sistema que utiliza la presión positiva continua a través de una interfaz nasal, oral u oronasal durante el sueño para tratar la apnea obstructiva del sueño central y la hipoventilación crónica (frecuencia respiratoria disminuida), disminuyendo tanto el índice del síndrome del sueño de apnea e hipoapnea como en la somnolencia durante el día objetiva y subjetiva y finalmente mejorando las variables de desempeño neuroconductual (procedimiento cognitivo, atención sostenida, la memoria y el estado de ánimo) [17].

En cuanto a la capacidad de mantener la velocidad, no se encontraron diferencias entre los grupos. Donde sí se apreció variación fue en la duración del parpadeo, ya que en quienes sufrían de OSAS fue considerablemente mayor con un promedio de 82,3 ms versus 51,9 ms del grupo control; mientras que en la latencia del sueño (tiempo que tarda en quedarse dormido), fue menor (23,2 min) para quienes sufrían el síndrome que para quienes no lo tenían diagnosticado (35,4 min).

En la repetición de las mediciones posterior al tratamiento, los parámetros no cambiaron para quienes no tenían la patología del sueño, mientras que para quienes si la poseían, sus parámetros se acercaron a los "normales". Cabe señalar que para la frecuencia de parpadeo, no se apreció diferencia en ambos grupos, antes ni después del tratamiento con CPAP [18].

## 2.3. Discusión

Dado lo expuesto en la primera parte de esta revisión bibliográfica se puede decir que es innegable la relación que existe entre el estado de vigilia, y el desempeño en la tarea de conducir. Una de las cosas importantes a considerar es si se cuenta con algún factor que altera el descanso, como por ejemplo el síndrome de apnea obstructiva del sueño, que al darle solución se disminuyen los riesgos de que la fatiga sea causal de un accidente. También puede ser importante ver las características de nuestra personalidad, ya que algunas personas son más o menos resistentes a la monotonía, por lo que definir las rutas idóneas para cada persona puede ser otra herramienta de control de riesgos. Pero lo anterior para largos trayectos puede no ser suficiente, ya que como se vio que luego de aproximadamente 80 minutos de conducción nuestro tiempo de reacción aumenta [6], por lo que aun así es imprescindible desarrollar sistemas automatizados, y a tiempo real de la detección de fatiga.

Si bien hasta no muchos años, eran pocos los dispositivos disponibles comercialmente, hoy existe un amplio abanico de técnicas para controlar la fatiga, a continuación se mencionan algunas de ellas y sus limitaciones:

Detección de cabeceos: como se expone en la primera parte de la revisión bibliográfica, los conductores u operadores pueden presentar microsueños que pueden durar solo breves segundos, por lo que detectar el cabeceo puede ser ya muy tarde a la hora de evitar accidentes.

Seguimiento de la posición del vehículo: Muestra sensibilidad a las condiciones del clima, y trabas al momento de pensarlo en espacios abiertos, como minería y en el área forestal (áreas productivas importantes en nuestro país), ya que no se presentan caminos marcados. Además de no solucionar el problema si el vehículo no se encuentra en circulación, y la tarea es operar maquinaria pesada (grúas, retroexcavadora, etc.), donde el trabajador si se queda dormido puede ser igual de grave, un ejemplo de esto es un accidente registrado en nuestro país, en la ciudad de Algarrobito, el 15 de Junio del 2012, donde el operador de una retroexcavadora falleció aplastado tras realizar una mala maniobra (Figura 4) [19].

Tono muscular y conductancia de la piel: Presenta la dificultad del rechazo al uso de los dispositivos, por la necesidad del contacto directo con el operador y la causa de irritación por la misma razón.

Condiciones de los ojos: Funciona a tiempo real e incluso si el vehículo no está en circulación, y no requiere estar en contacto con el usuario. Existen varias empresas y grupos de

científicos, que han generado dispositivos basados en estos parámetros.

Los dispositivos en desarrollo con esta tecnología, no presentan reportes detallados sobre límites de parámetros para determinar la somnolencia. Con objetivo de aterrizar esta tecnología a nuestro país, es que se vio la necesidad de desarrollar un dispositivo que evalúe parámetros oculares para asociarlos a un estado de vigilia disminuido.



**Fig. 4** Accidente causado por una mala maniobra del operador. El 15 de Junio del 2012, en Algarrobito. [19]

### 3. Propuesta de sistema de monitoreo de la vigilia

#### 3.1. Introducción

Como se ha señalado anteriormente en Chile así como en el mundo, la fatiga en la conducción es un problema de grandes consecuencias, debido a las repercusiones directas de muerte en accidentes como los costos materiales de los mismos. No se puede dejar de considerar la importancia que tiene el transporte terrestre de recursos, en estadísticas dadas por el ministerio de transporte y telecomunicaciones de Chile, respecto a al transporte de carga por carretera, se ve una circulación diaria a lo largo de los puertos del país de un promedio de 5.820 camiones, tal y como se ve en el gráfico de la Figura 5 y en el gráfico de la Figura 6 se muestran predicciones del déficit y superávit de operarios de camiones. Se aprecia que en la más baja de las estimaciones se tendrá un déficit de 205.481 conductores para el parque automotor, dejando no solo en claro la importancia del transporte terrestre, y su conexión con el bien estar de la economía (en un escenario de una economía normal el déficit sería mayor a uno de recesión), sino además la creciente demanda de esto [2].

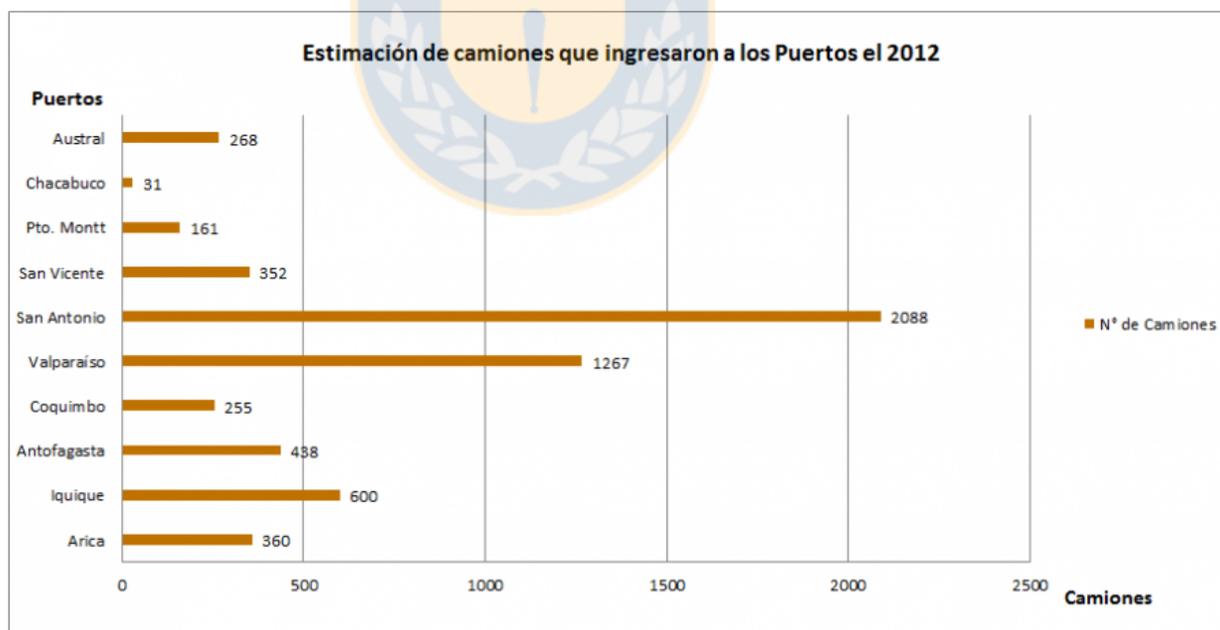
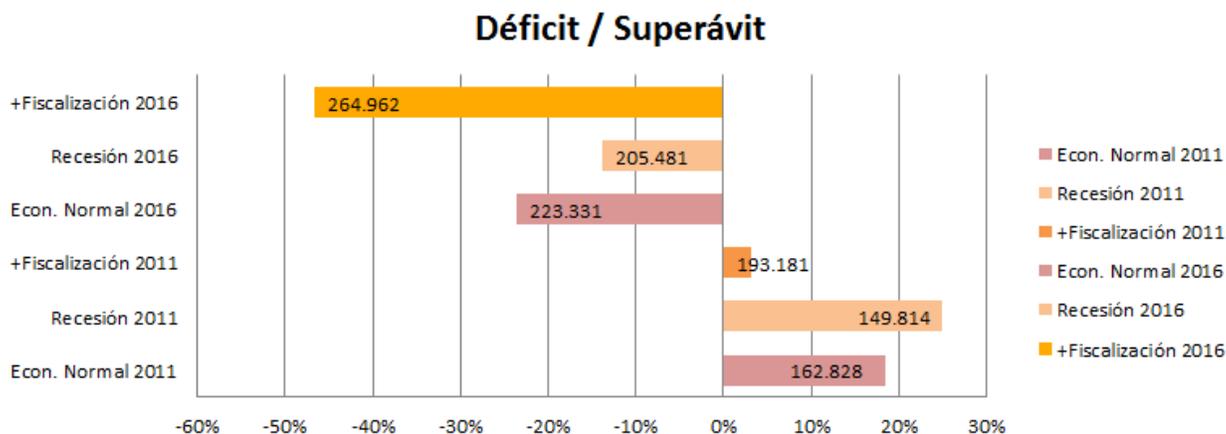


Fig. 5 Grafico de la estimación del ingreso promedio de camiones a los puertos del país en el año 2012 .[2]



**Fig. 6 Grafico de déficit y superávit estimado en condición de economía normal, recesión y en un aumento de fiscalización, para el 2011 y una estimación para el 2016. [2]**

Algo que solo acrecienta el problema es la importancia que tiene en nuestro país las áreas de producción de la minería [3] y forestal [4]. La importancia de la minería la expone el consejo minero (Asociación que reúne a las empresas mineras de mayor tamaño que operan en Chile) donde presenta que Chile posee una participación importante en la producción minera mundial, destacando principalmente en el molibdeno, siendo el tercero en el ranking con un 21% de participación en la producción mundial y aun mas en el cobre siendo el primer productor mundial con un 31% de la producción total. La importancia de la minería en Chile no se queda en el reconocimiento internacional de su participación, sino que tiene incidencia importante en el PIB del país[3]. Mientras que la importancia del área forestal la retrata la corporación nacional de estudiantes de ciencias forestales (CONECIF Chile), tanto buenas políticas públicas como el comportamiento de dinámico y competitivo del sector privado han permitido que el sector forestal sea un pilar fundamental en la economía nacional, aportando el 3,1% del PIB nacional, aportando con 130 mil empleos directos, siendo además el segundo sector exportador en Chile, contando con aproximadamente un quinto del área total del país dispuesto para el área forestal [4]. Ambos sectores requieren de grandes camiones y maquinarias, de alto peligro en caso de accidentes, dándole mayor relevancia a dar una solución a los riesgos de la somnolencia en los operadores y conductores.

Dentro de las tecnologías genéricas existentes para darle solución a la detección de la somnolencia, se observó un gran potencial en los parámetros oculares obtenidos por una cámara, ya

que tiene aceptación entre conductores y operadores por no ser invasivo, además de presentar buenos resultados. Por lo que definir los parámetros óptimos a controlar es de vital importancia. Es muy importante que se hagan en tiempo real, para que sea un sistema de prevención de accidentes, así que es importante obtener de forma automatizada el cálculo de estos parámetros.

Los parámetros oculares que se evaluarán son la duración de pestañeo, frecuencia de pestañeo y la razón del tiempo en que los ojos permanecen cerrados en un minuto (AVECLOS).

## **3.2. Objetivos**

### **3.2.1 Objetivo General**

Establecer comportamiento de parámetros oculares para una estimación del estado de vigilia, por medio de imágenes de video.

### **3.2.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar un programa que mida de forma automática la apertura ocular, para el cálculo de frecuencia de pestañeo, duración del pestañeo y AVECLOS para determinar fatiga.
- Relacionar los parámetros con el estado de vigilia, asociando estos mismos con tiempo de reacción.

## **3.3. Alcances y limitaciones**

De este trabajo no se espera generar un dispositivo final, sino un sistema sencillo que en condiciones de laboratorio, con control sobre la luz y los movimientos del sujeto de prueba, donde además se permite una instancia de calibración manual previa a las mediciones, permita obtener mediciones de los parámetros oculares.

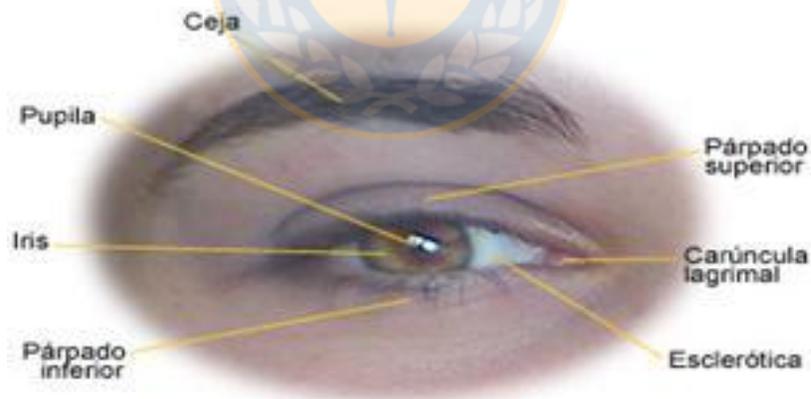
Las mediciones se llevarán a cabo en paralelo con una modificación del test de OSLER (test que se explica en siguiente sección), asociando los parámetros oculares medidos con el tiempo de respuesta

### 3.4. Metodología

El desarrollo se realizó con el uso de una cámara infrarroja mediante un software en el programa Python, utilizando las librerías que existen para el trabajo de imágenes de video, como "Open CV". Las mediciones se realizaron en condiciones de laboratorio en paralelo con un test de OSLER modificado.

#### 3.4.1 Luz infrarroja

Para estudiar los parámetros oculares es imprescindible conocer su teoría y anatomía básica. En la Figura 7 se observan las partes externas principales del ojo, las cuales necesitamos conocer puesto que es lo que se trabajara en las imágenes obtenidas por la cámara, destacando los párpados dado que su posición nos indica la apertura ocular. Mientras que en la Figura 8, se observan las partes principales de la anatomía interna del ojo, aquí la luz que ingresa por el cristalino y cornea, las capas más externas del ojo, unifican y dirigen estos rayos, para luego hacer contacto con la retina, la capa mas interna del ojo. La retina está compuesta por dos tipos de foto receptores (bastones y conos) que se diferencian por su sensibilidad a la luz, aquí se transforma la luz en impulsos eléctricos que son enviados por el nervio óptico hacia el cerebro para su procesamiento.



**Fig. 7** Partes externas del ojo. Donde para este trabajo se destacan los párpados, dado que su posición nos permite determinar la apertura ocular. [20]

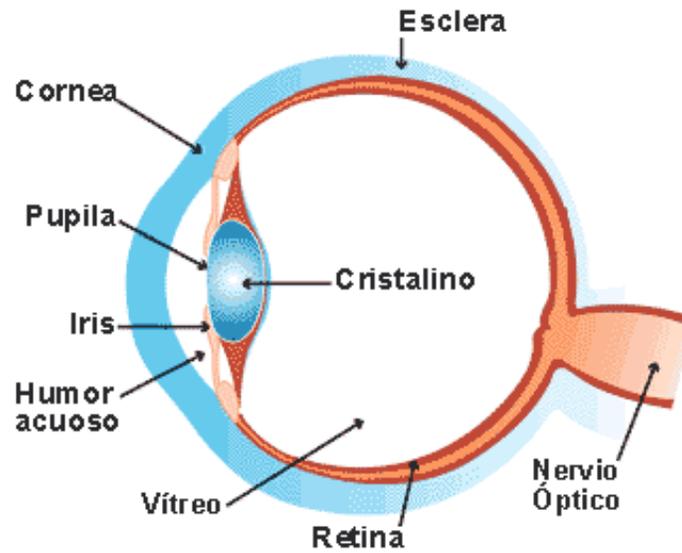


Fig. 8 Partes internas del ojo. Donde para este trabajo se destacan los párpados, dado que su posición nos permite determinar la apertura ocular. [21]

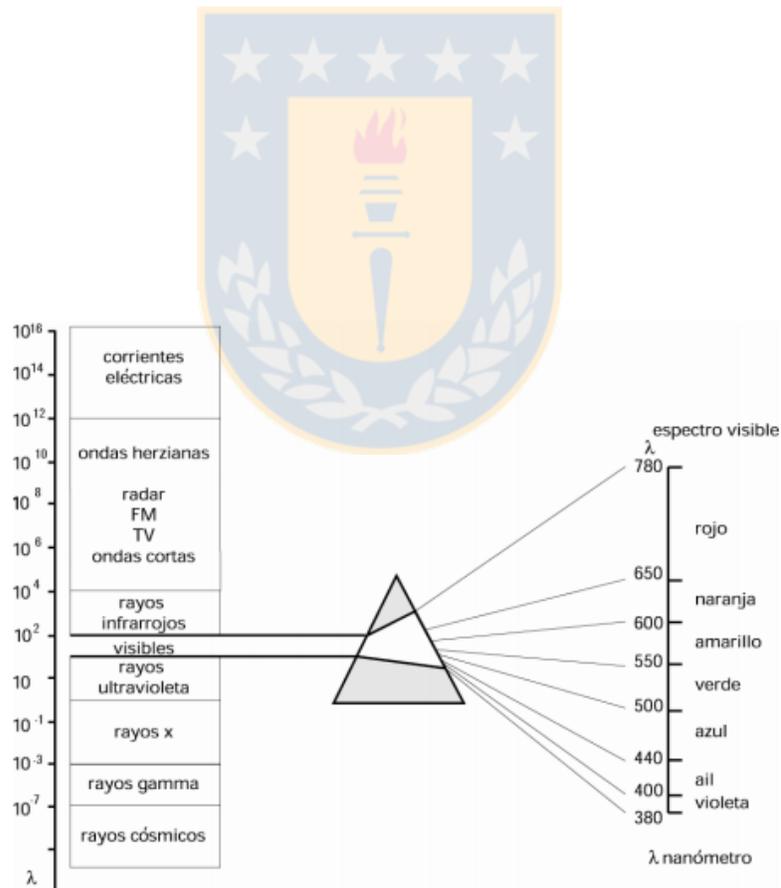


Fig. 9 Espectro electromagnético, donde se destaca el espectro visible [22]

La luz es una forma de radiación electromagnética, es a través de esta que nos conectamos visualmente con el mundo que nos rodea. La luz físicamente puede ser considerada como onda electromagnética o como corpúsculo, en el primer caso le caracterizan diferentes longitudes y frecuencias de onda en la que se encuentra, las longitudes de onda en la luz se extiende entre  $10^{-16}$  hasta los 105 metros extensión denominada espectro electromagnético, pero la retina es sensible a las longitudes entre los 380nm hasta los 780nm esta porción está definida como el espectro visible [22], lo anterior se esquematiza en la Figura 9. Para poder tener control de la luz sin tener incidencia en los ojos, se utilizó la luz infrarroja (IR), luz que se encuentra fuera del espectro de luz visible.

El espectro IR posee una longitud de onda mayor a al espectro visible, como clasificación más común, se puede dividir en 3 rangos de longitud de onda: IR cercano ( $0,75 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ ), IR mediano ( $5 \mu\text{m} - 30 \mu\text{m}$ ) e IR lejano ( $30 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ ). En este trabajo se utilizó el cercano, ya que los elementos requeridos son de menor requerimiento técnico y por ende mas económico [23].

### 3.4.2 Test de OSLER

El test de OSLER, es un simple test utilizado para la evaluación de la somnolencia. Para llevarlo a cabo la persona evaluada debe observar una luz y debe acusar apretando un botón cada vez que esta se encienda. La prueba tiene una duración de 40 minutos, y se realiza 4 veces a lo largo del día en intervalos de 2 horas. El sujeto no debe tomar bebidas alcohólicas, cafeína ni consumir chocolate el día de la prueba ni la noche previa [24].

Para realizar las mediciones se definieron modificaciones al test de OSLER. Se llevó a cabo solo una prueba, la cual no se limitó a 40 minutos, sino al tiempo que tardó la persona en quedarse dormido o hasta que el sujeto declaró extremo cansancio, rescatando los tiempos de reacción (tiempo encendido de luz y el apriete del botón). Lo anterior debido a que se desea encontrar parámetros asociables a instantes previos al dormir. Además de poder asociarse con el estado de vigilia, el tiempo de reacción, es una variable importante a considerar al momento de conducir [6], por lo que fue importante rescatar esa variables de las mediciones para su asociación con los parámetros oculares.

La luz se enciende en tiempos aleatorios entre los 3 y 7 segundos, y no en un tiempo constante, evitando así la disminución de este tiempo por efecto de aprendizaje del sujeto de prueba, manteniendo así esta variable relacionada en plenitud con la capacidad de atención que permite la vigilia en ese momento.

### 3.4.3 Consideraciones para realizar mediciones

#### 3.4.3.1 Criterio de inclusión de sujetos de prueba.

Para cumplir con el objetivo de que los datos sean significativos junto con que permitan el menor error posible, los sujetos de prueba debían cumplir con los siguientes criterios:

1. Deben ser mayores de 18 años, debido a que son ellos quienes tienen la edad potencial para conducir un vehículo.
2. Deben ser capaces de distinguir el encendido de un led rojo sin el uso de los lentes, para evitar que elementos ajenos a los componentes faciales generen error en los datos.
3. En el caso de sujetos con el pelo largo, deben poder evitar que este quede frente a los ojos o a los costados, para que no se presenten ruidos al momento de distinguir la apertura ocular.

#### 3.4.3.2 Protocolo de medición

Para realizar las mediciones se requiere además de un sujeto de prueba, de un evaluador. A continuación se presenta las indicaciones y protocolo a seguir para cada uno.

##### a. Para el sujeto de prueba:

1. Se debe sentar cómodo en el asiento dispuesto para la medición, evitando necesitar posteriormente movimientos bruscos para acomodarse
2. Cada vez que encienda el led rojo debe presionar lo antes posible el pulsador, esta acción encenderá un led verde indicando el correcto funcionamiento. Una vez soltado el pulsador se apagará la luz verde, y debe estar preparado para repetir el procedimiento.
3. La medición terminará cuando el sujeto de prueba se quede dormido o cuando exprese extremo cansancio sin poder conciliar el sueño.
4. El sujeto de prueba tiene la libertad de poder interrumpir la medición por incomodidad.

**b. Para el evaluador:**

1. Se deben dar las indicaciones al sujeto de prueba y pedirle firme el formulario de consentimiento informado (Anexo A).
2. Se debe conectar la cámara infrarroja, apuntándola al rostro del sujeto de prueba, al puerto USB del computador con el programa de medición, el que debe tener el software Python instalado y las respectivas librerías y archivos en la misma carpeta.
3. Se deben enchufar y encender los dos focos con led infrarrojos, apuntando uno a cada lado del rostro.
4. Se conecta el microcontrolador con sus elementos (led rojo, led verde y pulsador) al computador, comprobando que queden asociado a un puerto COM del ordenador.
5. Se abre y da inicio al software de medición de Python.
6. Se inicia el procedimiento presionando el botón "Comenzar Calibración" y se comprueba la posición de la cámara (debe lograrse la detección de rostro).
7. Se le reitera las indicaciones al sujeto de prueba asegurándose no existan dudas pendientes.
8. Se realiza el proceso de calibración donde por medio de la acomodación de los focos y el manejo del valor del umbral para transformar la imagen en blanco y negro, se busca el aislamiento de los ojos en la zona ocular.
9. Una vez finalizada la calibración se presiona el botón "Comenzar Captura", se le da un nombre a la medición asegurándose sea un nombre único para esta (lo importante es evitar la pérdida de pruebas por sobrescribir con la ultima realizada) y se hace click en el botón "continuar".
10. Durante la medición, con las mismas herramientas que para la calibración, manejar y asegurar el aislamiento de los ojos en las zona ocular.
11. Finalizar la medición cuando el sujeto de prueba se quede dormido o este indique detenerla (en el último caso registrar la razón de la detención).

## 4. Sistema de adquisición y procesamiento de datos

### 4.1. Introducción

El trabajo constó primero en el uso de una cámara web, la cual fue modificada para ser una cámara infrarroja. Posteriormente se realizó un software que identifica la apertura ocular, con lo que se obtiene un registro del comportamiento de esta variable. Se programó además un microcontrolador para realizar una variación del test de OSLER en paralelo con la medición, rescatando el tiempo de reacción. Finalmente se diseñó un algoritmo en Matlab el que con el registro de la apertura ocular, calcula la duración y frecuencia de pestañeo, PERCLOS y la razón del tiempo con los ojos cerrados y abiertos, para definir el comportamiento de estas variables con el estado de vigilia y tiempo de reacción.

### 4.2. Hardware

#### 4.2.1 Cámara

A una cámara web con la que se contaba (Figura 10), marca: pctrnix modelo: wc-19-sn325, con las especificaciones técnicas expuestas en la Tabla 2, se le extrajo el filtro de luz infrarroja, para reemplazarlo por negativo de fotografía (Emulsión fotografica), papel que filtra la luz visible pero permite pase la luz infrarroja, la que es captada por los foto sensores de la cámara. Lo anterior se realizó con el propósito de contar con una buena calidad de imagen teniendo el control de la luz sobre los ojos, sin alterar los parámetros oculares por la incomodidad de usar el espectro visible.

**Tabla 2: Especificaciones técnicas de la cámara utilizada.**

Característica	
Lente (Apertura del diafragma)	F 1.8
F(Determina el ángulo del lente)	6 mm
Ángulo de visualización	62°
Resolución	640x480 p



**Fig. 10** Cámara utilizada, marca: pctronix modelo: wc-19-sn325.

Para contar con la fuente de luz infrarroja se utilizaron dos linternas led, realizando el cambio de sus diodos originales por emisores de luz infrarroja. Para evitar una luz inconsistente y con variabilidad por el agotamiento de las pilas, causante de ruido en las mediciones, se cambió la fuente de alimentación en base a pilas a una alimentación directa a la red eléctrica por medio de transformadores. Las linternas se alimentaban originalmente por medio de 3 pilas "AA", lo que equivale a 4,5 volt. Con una fuente de poder se aplicó este voltaje y se midió la corriente que requería el circuito de las linternas, resultando un promedio entre los 70mA y 80 mA para cada una, por lo tanto se utilizó 2 transformadores de 4,5 volt con una capacidad de al menos 80 mA para reemplazar la alimentación inicial del circuito.

#### **4.2.2 Test de Osler**

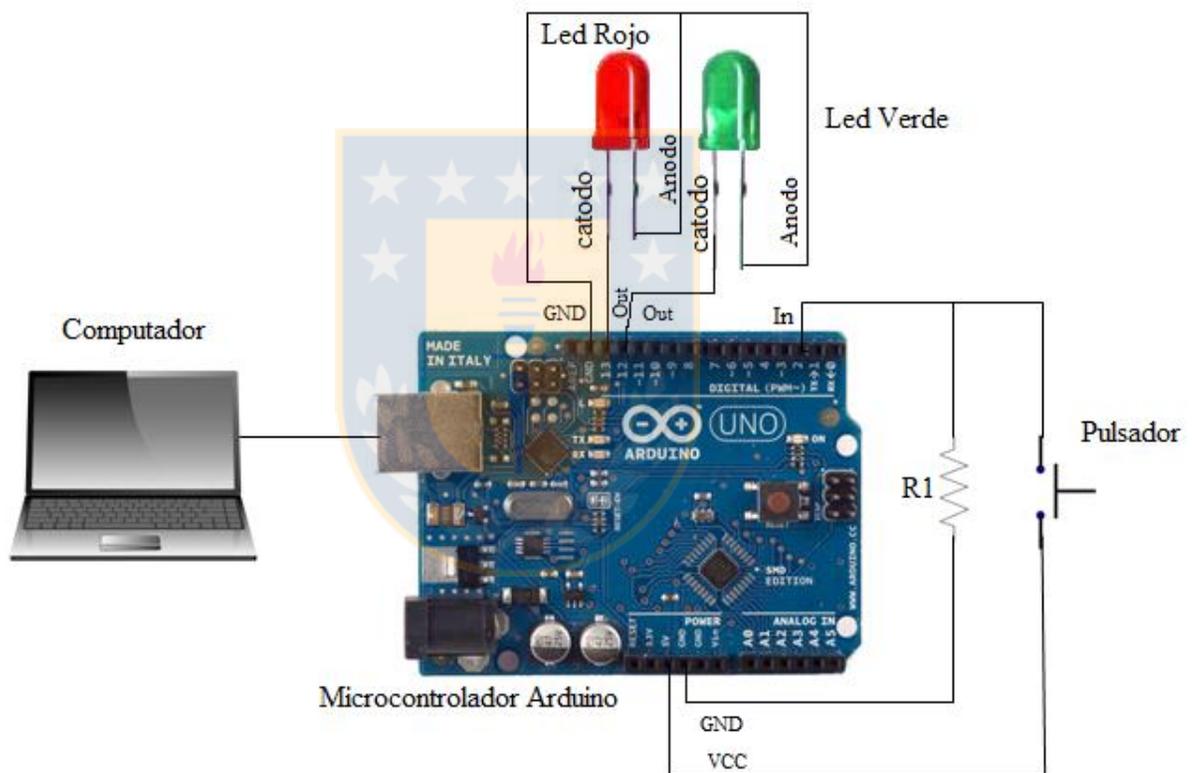
Para realizar la variación del test de OSLER, se programó un micro controlador Arduino Uno con el que se contaba, el cual tiene un voltaje de operación de 5 volt, 14 pines Digitales (In/Out) y una velocidad de reloj de 16 MHz [25]. Se usó este microcontrolador ya que ofrece una fácil programación, además gracias a su velocidad de reloj cuenta con una precisión suficiente para el análisis de la variación del tiempo de reacción.

Se describen 2 tipos de tiempos de reacción, el Tiempo de Reacción Simple (TRS), que es el tiempo que se tarda en indicar el momento en el que aparece un estímulo, y su valor promedio es de 180-200 ms para un estímulo visual; y el Tiempo de Reacción Complejo (TRC), que es el tiempo que se tarda en realizar una tarea ante un estímulo, donde se debe decidir la acción a llevar a cabo según el estímulo recibido, éste es mayor que el TRS porque incluye adicionalmente una latencia

perceptual y una de decisión (Modelo Aditivo de Donders). El TRC muestra alta dependencia al entrenamiento del sujeto a prueba y es en promedio 44 ms mayor al TRS [26].

En este caso se usó el TRS, ya que se evita la influencia del entrenamiento que podrían o no tener los sujetos de prueba. Por lo tanto el test de OSLER se mantuvo intacto en este aspecto, ya que la respuesta (apretar un pulsador) es siempre la misma y para el mismo estímulo (encendido de una luz).

El pin 2 se configura como entrada para un pulsador, otros dos se configuran como salida, el pin 12 y 13 para un led verde y otro rojo respectivamente. Se muestra un diagrama en la Figura 11.



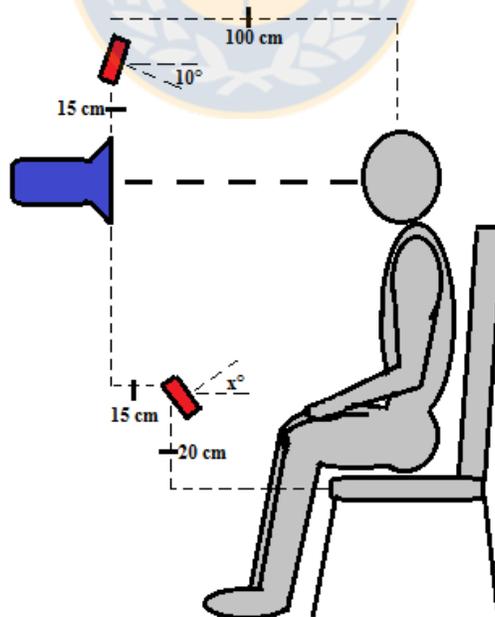
**Fig. 11** Diagrama de conexión de microcontrolador, donde ambos led (rojo y verde) comparten tierra, y cada uno se alimenta de su propio pin configurado como salida. Se observa además la conexión del pulsador en el pin 2 configurado como entrada, donde se agrega una resistencia de alto valor (1 M ohm) para evitar el ruido cuando el pulsador no está presionado.

### 4.2.3 Sistema completo de adquisición de datos

Una vez implementado el sistema para la adquisición de datos, se procede a realizar las mediciones, para lo cual fue importante definir los elementos necesarios y su disposición.

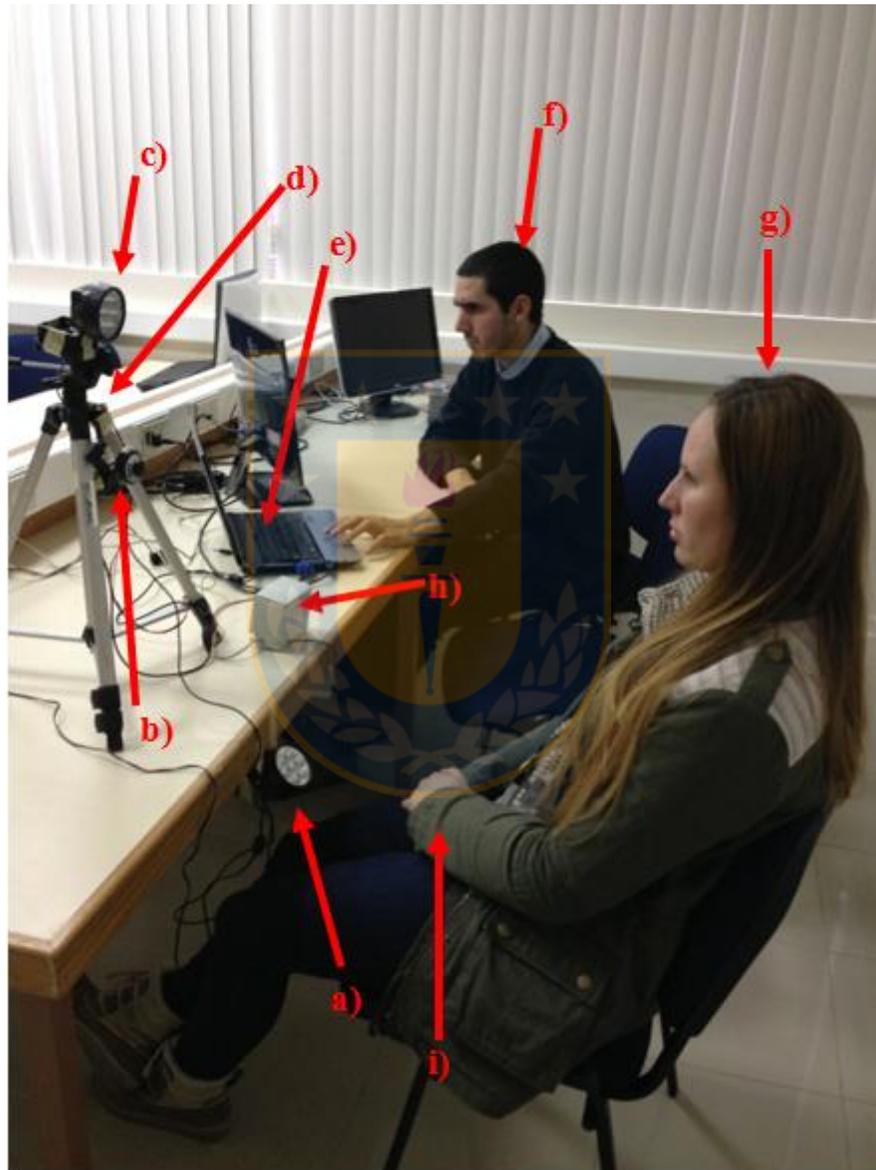
La posición de la cámara y de los focos de luz infrarroja se muestran en el diagrama de la Figura 12. Primero, ambas fuentes de luz infrarroja se ubican en la misma línea vertical de la cámara, pero apuntando en direcciones contrarias, una iluminando desde abajo y otra desde arriba a la cara del sujeto de prueba (Figura 13.a y 13.c respectivamente), evitando se generen sombras en el rostro, al utilizar dos fuentes de luz contrapuestas [27]. En este caso la luz superior se consideró la principal, y la inferior fue la de soporte o compensación. La cámara (Figura 13.b) se ubica a la altura del rostro y sobre esta se ubican los led (rojo y verde) (Figura 13.d); así se mantiene al sujeto de prueba (Figura 13.g) mirando estas luces, permaneciendo su cara de frente a la cámara.

Se necesita de un computador (Figura 13.e) que contenga el programa de adquisición y el software Python con las librerías necesarias instaladas, el cual recibe y grafica la señal de apertura ocular. Esa visualización de datos sirve para que un supervisor (Figura 13.f) pueda fijar en un principio el valor con el que se lleva a cabo la umbralización y constate la utilidad de la imagen con el control de éste a lo largo de la prueba.



**Fig. 12** Diagrama de posicionamiento de la cámara (objeto azul) y de los focos (objetos rojos). El foco superior se posiciona respecto a la cámara, la cual se ubica a la altura del centro del rostro del sujeto. El foco inferior se ubica a 20 cm por sobre la altura de la silla, y debe disponerse en dirección del rostro, con ángulo variable, debido a que dependerá de la altura del sujeto de prueba la posición de su cara.

Finalmente para realizar en paralelo la obtención de los tiempos de reacción a un estímulo visual, se ubicó en una caja el microcontrolador (Figura 13.h), el que alimenta las luces led, y recibe la información del pulsador que el sujeto de prueba mantiene en la mano (Figura 13.i).

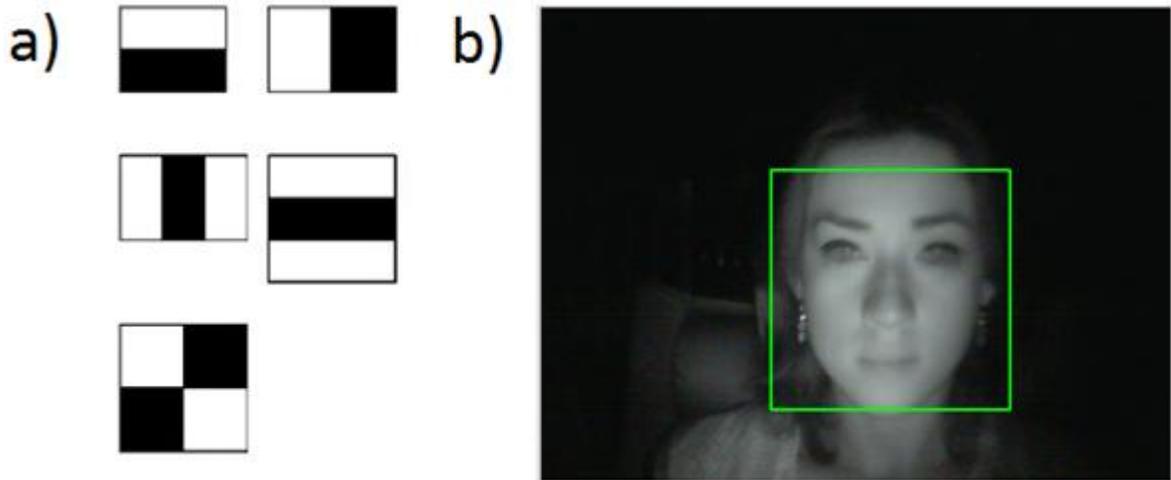


**Fig. 13** Elementos requeridos para la adquisición de datos. a) Fuente de luz infrarroja. b) Cámara infrarroja. c) Fuente de luz infrarroja. d) Luces Led (roja y verde). e) Computador con los software necesarios. f) Supervisor. g) Sujeto de prueba. h) Microcontrolador Arduino. i) Pulsador.

## 4.3. Software

### 4.3.1 Algoritmo de medición de apertura ocular (Python).

Lo primero fue el software para obtener los vectores de apertura ocular respecto al tiempo. Para detectar el evento del pestañeo debemos identificar la apertura ocular, para lo que es imperativo identificar los párpados. Por lo anterior, se identificó el área ocular. Para reducir el área de búsqueda de los ojos, se realizó una detección de rostros. Se transformó la imagen de video obtenida a escala de grises para posteriormente ser llevada a blanco y negro usando comandos de la librería Open CV. Se utilizó una función perteneciente también a la librería OpenCV de Python, la que realiza una detección de rostro por "Haar Cascades". El enfoque del algoritmo se basa en el aprendizaje automático de las máquinas, donde a partir de un entrenamiento con una gran cantidad de imágenes positivas (imágenes con el objeto que se desea identificar ) y negativas (imágenes sin el objeto a identificar) se entrena un clasificador, en este caso se usó la base de datos denominada "haarcascade\_frontalface\_default", la cual cuenta con las ilustraciones para la preparación de la detección facial, donde las imágenes positivas y negativas se diferencian por la presencia o ausencia de rostros . En estas imágenes de entrenamiento se aplican rectángulos en blanco y negro que se pueden observar en la Figura 14.a, donde se realiza la resta entre la suma del área bajo pixeles blancos y la suma de los pixeles bajo el color negro. El resultado de esas operaciones se denominan "características" de la imagen. Todas estas características diferencian las imágenes positivas y negativas con consideraciones tales como por ejemplo que la zona de la nariz como las cejas presentan mayor oscuridad, pero a la vez diferente niveles de sombra entre ellas, permitiendo la identificación de rostros en las nuevas imágenes a calificar por medio de las características [28]. Un ejemplo de este procedimiento se encuentra en la Figura 14.b.



**Fig. 14** Rectángulos en blanco y negro con los que el algoritmo de detección de rostros por Haar Cascades calcula las características diferenciadoras entre imágenes positivas (rostros) y negativas (no rostros) [24]. b) Ejemplo de funcionamiento de algoritmo de detección de rostros.

Una vez definido el rostro, se procedió a encontrar los ojos dentro del área facial. Del mismo modo, como se establece el rostro, se cuenta con bases de datos entrenadas para la detección de ojos, estas son "haarcascade\_eye", "haarcascade\_eye\_tree\_eyeglasses", "haarcascade\_lefteye\_2splits" y "haarcascade\_righteye\_2splits". En la Figura 15 se muestran los resultados de la aplicación de estas clasificaciones, donde se puede observar que se dan errores de falsos positivos, clasificando como ojos otras partes de rostro como la nariz o la boca. Pero cabe destacar que el algoritmo no presenta dificultades en la detección de los ojos en ambos estados (abiertos y cerrados), como se muestra en la Figura 16.

Otra alternativa entonces es seleccionar un área ocular como una sección fija del rostro, para esto se consideró estudios radiográficos, fotográficos y clínicos junto con el análisis cefalométrico basado en líneas y medidas matemáticas estandarizadas y aceptadas universalmente. La cara se divide en 5 cortes sagitales del mismo ancho, donde cada una de estas partes tiene el ancho de un ojo, donde los ojos se encuentran en el segundo y cuarto quinto del rostro [29]. Con esta consideración se dividió el ancho de la cara en 10 partes iguales y se consideró desde la segunda hasta la penúltima división como ancho de la zona ocular, para dar un margen de libertad de un décimo del ancho de la cara hacia derecha e izquierda. Esto se aprecia en la Figura 17

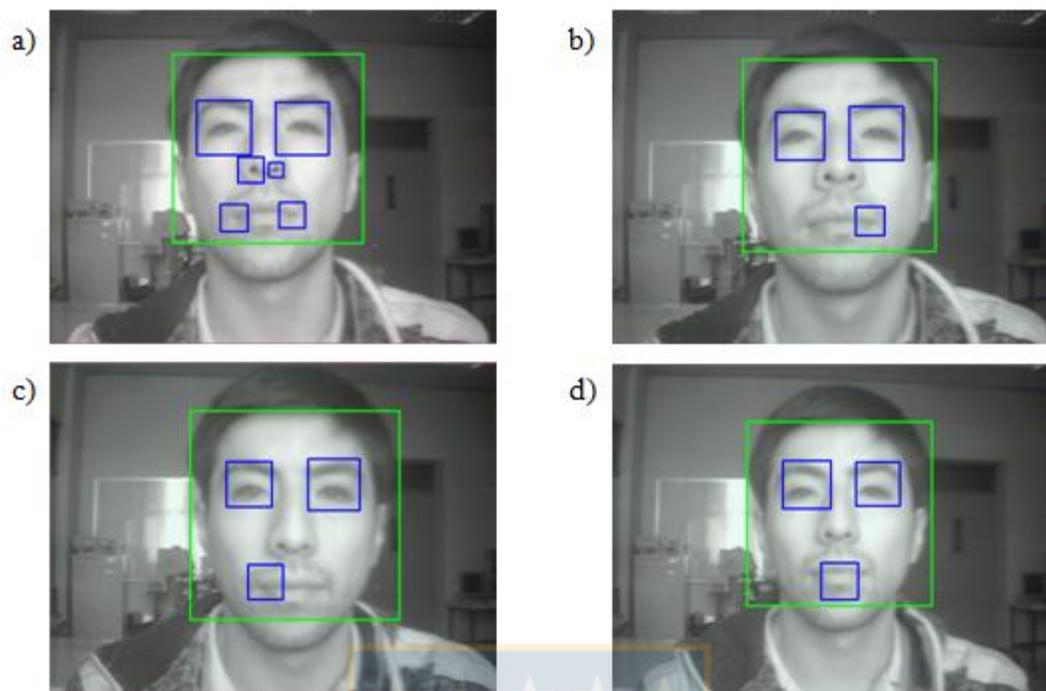


Fig. 15 Se observan los resultados de la detección de ojos (cuadros azules) dentro del área de rostro (cuadros verdes) para cada sistema de entrenamiento. a)"haarcascade\_eye": Se muestran como falsos positivos las fosas nasales, y los bordes de los labios. b)"haarcascade\_eye\_tree\_eyeglasses": El borde derecho del labio es detectado como ojo. c)"haarcascade\_lefteye\_2splits": Para este caso se presentan dos falsos positivos, el borde izquierdo del labio y el ojo derecho, puesto que solo debería detectar el izquierdo. d)"haarcascade\_righteye\_2splits": Este sistema está entrenado para la detección del ojo derecho, por lo tanto la detección del ojo izquierdo es un error al igual que el de la boca.

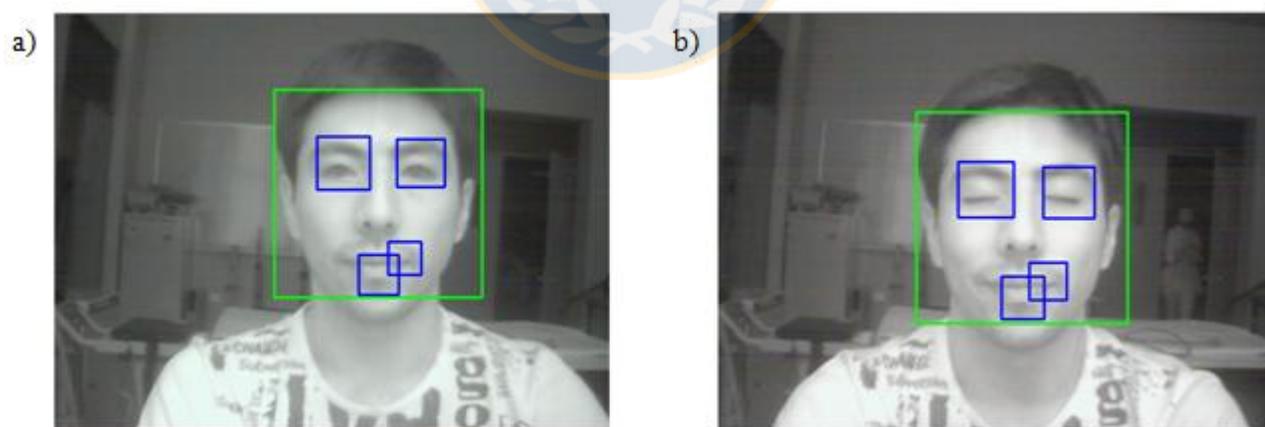
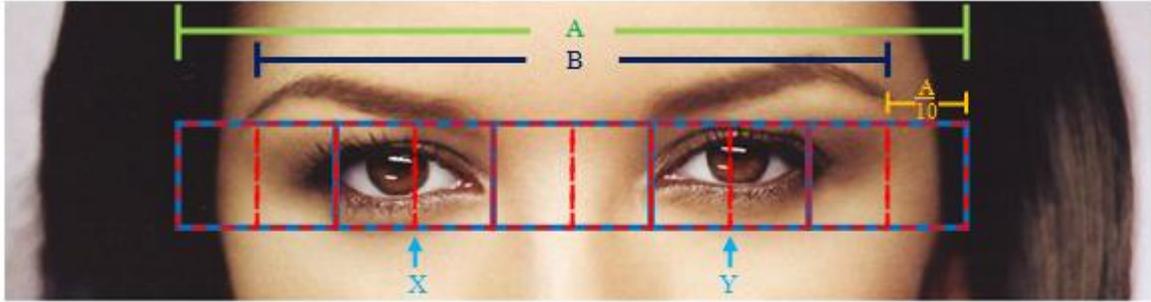
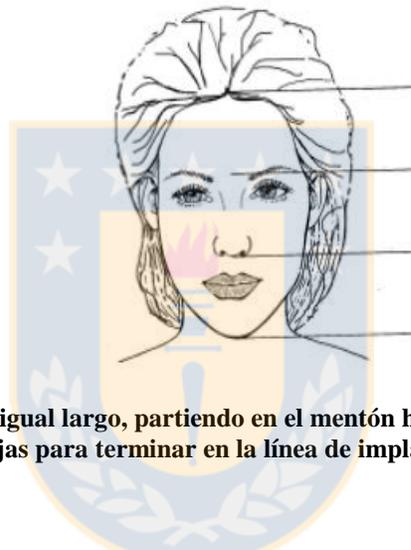


Fig. 16 Se observa que el algoritmo detecta los ojos abiertos (a) y cerrados (b), teniendo problemas de detección de falsos positivos de la misma forma en ambos casos.



**Fig. 17** "A" corresponde al ancho de la cara, mientras que "B" es el ancho del área ocular seleccionada. La mitad del ancho de los ojos se encuentran en las líneas del primer y último cuarto del ancho ocular (X e Y respectivamente).



**Fig. 18** Rostro dividido en 3 partes de igual largo, partiendo en el mentón hasta la base de la nariz, de ahí hasta la zona media de las cejas para terminar en la línea de implantación del pelo[29].

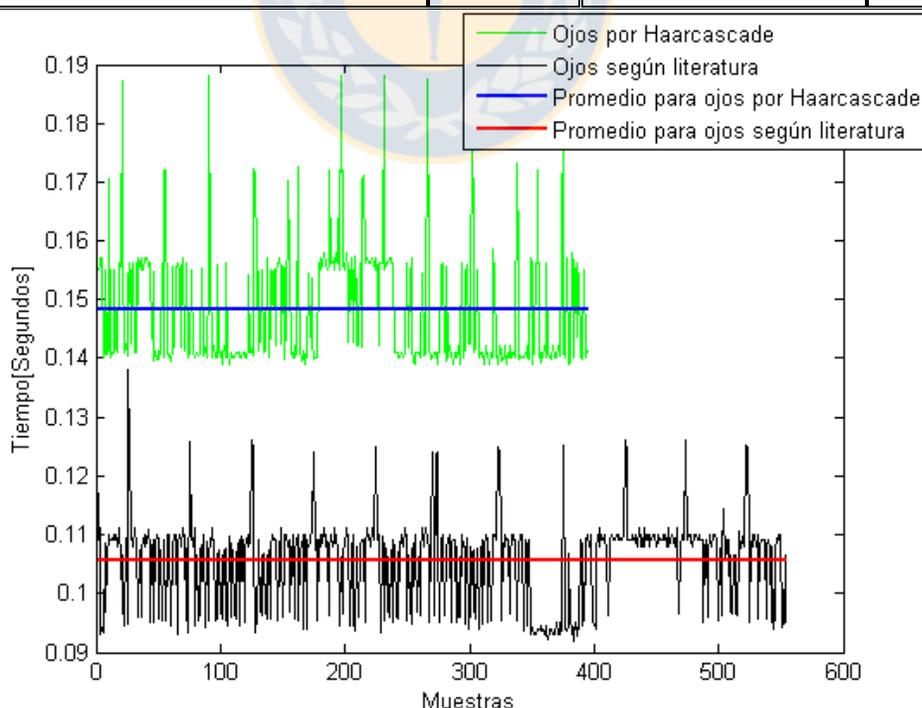
Si dividimos la cara en cortes axiales en 3 partes iguales, la parte más baja llega desde el mentón a la base de la nariz, la parte media va desde la base de la nariz a la altura de las cejas, y la tercera parte se completa desde la altura de las cejas hasta la línea de implantación del pelo (Figura 18) [29]. Con el conocimiento de los datos anteriores, la base del área ocular se ubica en la mitad del largo del rostro (correspondiendo a la mitad del segundo tercio axial) quedando por sobre de la base de la nariz y por debajo de los ojos; y la parte alta de la zona ocular se definió en la quinta parte superior del largo del rostro, ubicándola con un pequeño margen por sobre las cejas.

El modo en que funciona el método de captura de OpenCV utilizado, es que se obtiene una imagen cada vez que se aplica la línea de código respectiva, por lo tanto entre frame y frame se encuentra el tiempo de procesamiento de las imágenes. Por lo tanto para decidir si se buscaba la zona ocular por Haarcascade o se definía con herramientas de la literatura, se llevó a cabo una captura de 1 minuto. Se comparó el tiempo entre frames para ambas posibilidades, ya que al considerar que lo que se esperaba evaluar (pestaños) es del orden de unos cientos de ms, podría

hacer la diferencia el tiempo de ejecución del programa entre frames. En la Tabla 3 se muestra el promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de tiempos entre frames para cada una de las pruebas, donde se aprecia que el promedio de tiempo entre capturas es 40,3 % mayor para el algoritmo de detección de ojos por haarcascade, además se evidencia que el mínimo de este método es mayor al máximo de la opción de definir una zona ocular fija respecto al rostro, lo que junto con la desviación estándar nos permite concluir que los tiempos entre dos opciones son significativamente diferentes, evidenciándolo además en la Figura 19. Por todo lo anterior es que finalmente se optó por dejar de lado la detección de ojos por haarcascade, y el área ocular se definió como un lugar a razón del área facial con ayuda de la literatura.

**Tabla 3: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de los tiempos entre frames que se obtienen tras la aplicación de los algoritmos para definir la posición de los ojos.**

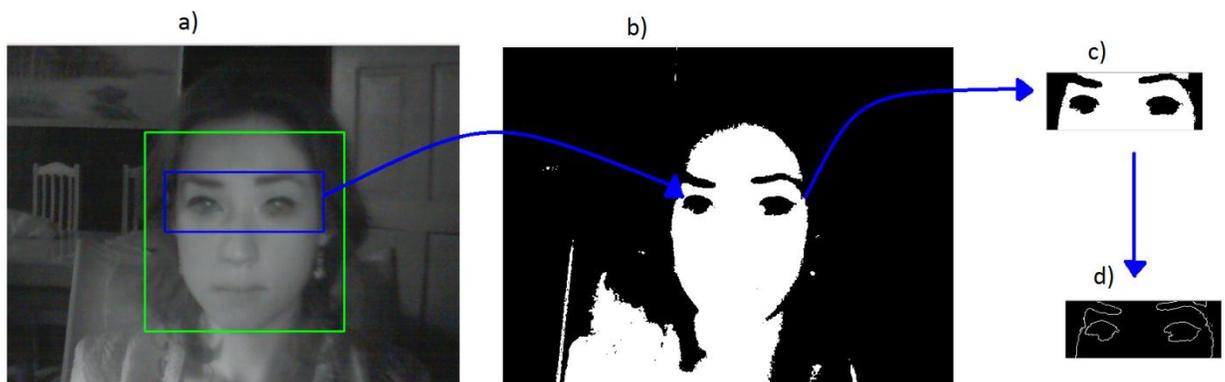
	Promedio [seg]	Desviación estándar [seg]	Máximo [seg]	Mínimo [seg]
Tiempo entre frames para detección de rostros y ojos por haarcascade	0.1483	0.0100	0.1881	0.1391
Tiempo entre frames para definición zona ocular según literatura	0.1057	0.0075	0.1382	0.0919



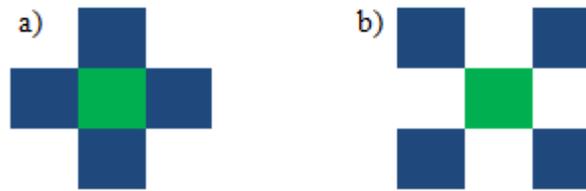
**Fig. 19** Vectores de tiempo para el tiempo entre frames para la detección de ojos en el área facial por haarcascade(verde) y establecidos por literatura(negro) con sus respectivos promedios.

Previo a la identificación de párpados, se extrae el área ocular definida a la imagen transformada a blanco y negro previamente, a la cual se le aplica detección de bordes. Este procedimiento se observa en la Figura 20, aquí se aprecia además que se pueden identificar los párpados y las cejas pero estas últimas no siempre son observadas, mientras que desde abajo lo primero que se halla es el párpado inferior. Así para encontrar primero siempre los párpados, se busca desde abajo el primer borde, ubicando dos puntos (uno para cada ojo) en la base de la zona ocular, uno queda en medio del segundo quinto del ancho facial y el otro en medio del cuarto quinto del ancho facial, donde se mencionó anteriormente se ubican los ojos (figura 17). Estos bordes corresponderán a puntos de los párpados inferiores, los que se completan buscando las componentes conexas.

Posteriormente se encuentran los bordes siguientes, correspondientes a puntos de los párpados superiores, los que se completan también por medio de las componentes conexas. Para el procesamiento de imágenes se consideran distintas condiciones de vecindad, como se ve en la Figura 21.a un pixel tiene 4 vecinos horizontales y verticales denominando "Vecindad 4" a este conjunto de puntos. También existen 4 vecinos diagonales (Figura 21.b), que junto con los puntos anteriores se le conoce como "Vecindad 8". Cuando un pixel tiene el mismo valor que un vecino o estos comparten algún otro criterio se les conoce como componentes conexas, en este caso se consideró la Vecindad 8 y el criterio de igualdad de valor [30].



**Fig. 20 Pasos de la aislación de la zona de los ojos. a)** Se muestra un ejemplo de rostro con área ocular definida. **b)** Imagen umbralizada. **c)** Zona ocular extraída de la imagen umbralizada. **d)** Detección de bordes a zona ocular.



**Fig. 21 Tipos de relaciones de vecindad entre píxeles vecinos a)** Vecindad 4: vecinos horizontales y verticales. **b)** vecinos diagonales.

Al comparar en la imagen de bordes, los ojos cerrados y ojos abiertos, se aprecia que una diferencia en la distancia entre párpados, por lo tanto se calcula la distancia entre éstos para evaluar la apertura de los ojos.

Observando los puntos que conforman los párpados, se observa inestabilidad generada por los movimientos de la pupila. En el sistema oculomotor se distinguen 3 tipos principales de movimientos oculares: 1) Movimientos automáticos de compensación de los movimientos de la cabeza y del entorno visual para estabilizar la imagen y posibilitar la fijación voluntaria en un determinado punto. 2) Movimientos voluntarios para desplazar la fijación de un punto a otro y para seguir con la mirada objetos móviles. 3) Micro movimientos asociados a la fijación ocular. Estos últimos se caracterizan por ser rápidos, constantes e independientes para cada ojo, durante la fijación visual los ojos no permanecen totalmente inmóviles [31], la importancia de estos movimientos es evitar la saturación de los foto receptores de la retina y con esto el desvanecimiento de la imagen [32]. Estos movimientos son los que generan inestabilidad en los puntos de los párpados, especialmente en los párpados inferiores, pero por medio de la observación, se apreció que los puntos máximos y mínimos de los párpados superiores e inferiores respectivamente se comportan con valores relativamente constantes. Entonces la diferencia entre estos puntos es la que se trabajará como distancia entre párpados (apertura ocular). Las funciones de distancia entre píxeles comúnmente utilizadas son la distancia Euclidiana, distancia Manhattan y distancia tablero de ajedrez.

La distancia Euclidiana entre dos puntos es la distancia ordinaria, la que se puede deducir a partir del teorema de Pitágoras, usando la fórmula (1).

$$\text{Distancia}(P, Q) = \sqrt{(Px - Qx)^2 + (Py - Qy)^2} \quad (1)$$

Para el caso de la distancia Manhattan se considera solo los vecinos de la Vecindad 4. Usando la fórmula (2).

$$\text{Distancia}(P, Q) = |Px - Qx| + |Py - Qy| \quad (2)$$

Finalmente para la distancia de tablero de ajedrez se considera la Vecindad 8, donde cada uno de estos pixeles tiene una distancia unitaria. Se calcula mediante la fórmula (3) [30].

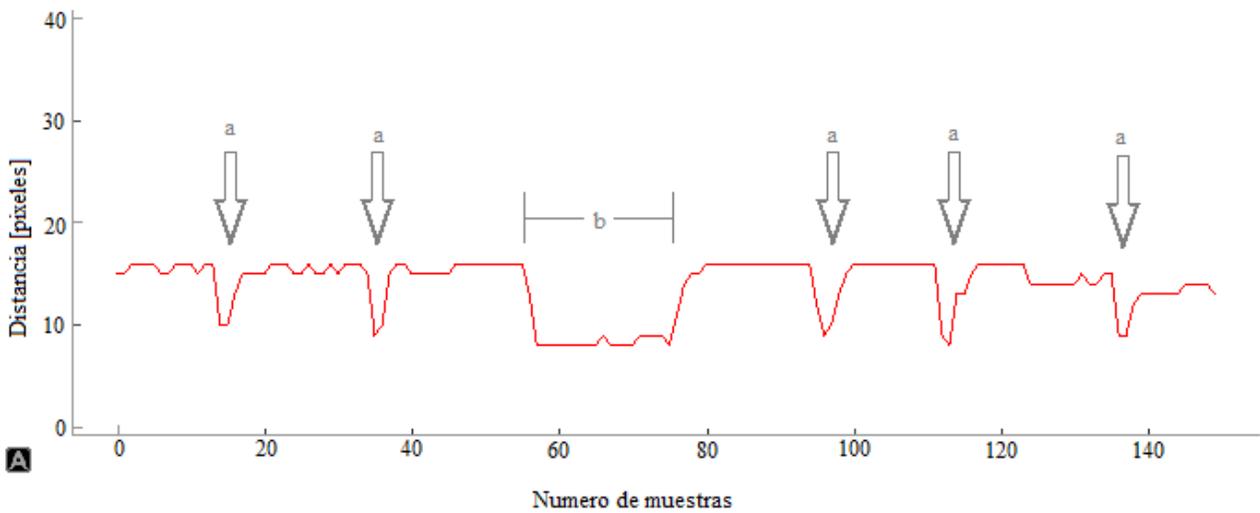
$$\text{Distancia}(P, Q) = \text{Max}(|Px - Qx|, |Py - Qy|) \quad (3)$$

En este caso, para la distancia entre el punto máximo del párpado superior y el mínimo del inferior se calculó con la Vecindad 8, pero a diferencia de la distancia de tablero de ajedrez, se considero solo el eje y, dado que la distancia en ese eje es la que nos da la información de la apertura ocular, usando la fórmula (4).

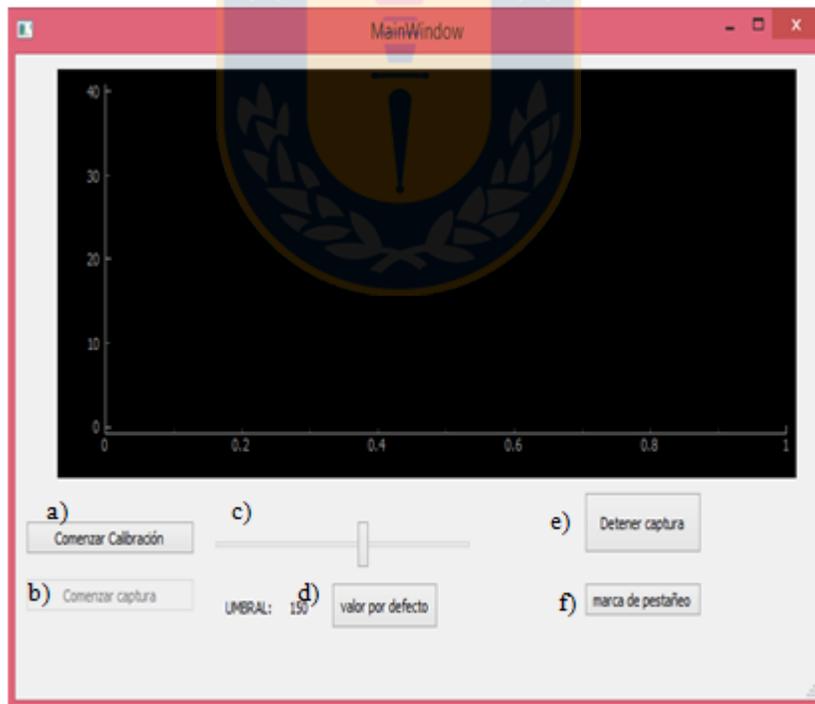
$$\text{Distancia}(P, Q) = |Py - Qy| \quad (4)$$

Esta distancia se grafica a tiempo real, en la Figura 22, donde se observa que en este vector se diferencia el ojo cerrado del abierto. Dando la facilidad de identificar el evento del pestañeo e identificar también cuando el ojo permanece cerrado. Cabe destacar que el cierre de ojos no llega a cero, dado que los parpados generan grosor, lo que se debe considerar al momento de diseñar el algoritmo de cálculo de parámetros oculares.

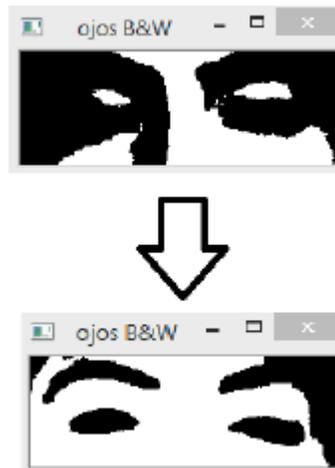
Para llevar a cabo de mejor forma el programa descrito, se diseñó una plataforma interactiva, con botones de comenzar y detener captura, además de un "slider", el que nos permite modificar el valor de umbralización (Figura 23). El poder cambiar este umbral es importante, puesto que nos da la alternativa de realizar una calibración manual, evitando así problemas de componentes conexas, por ejemplo al unirse los bordes de los ojos con las sombras del rostro, un ejemplo de esto se ve en la Figura 24.



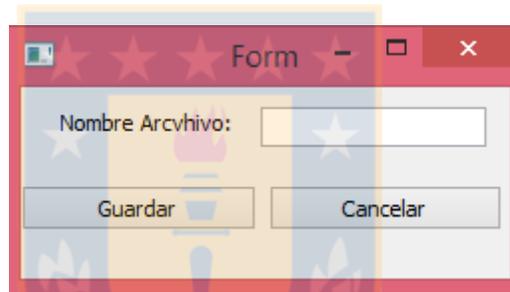
**Fig. 22** Grafica de vector de distancia entre punto máximo del parpado superior y el punto mínimo del parpado inferior. Se encuentran marcados los eventos de pestañeo (a), e igualmente el instante donde los ojos permanecen cerrados (b).



**Fig. 23** Plataforma interactiva principal **a)** Con este botón se llama a la siguiente ventana(ventana de guardado), se comienza la calibración y activa el botón comenzar captura. **b)** Al apretar este botón, se marca el momento de comienzo de guardado de datos. **c)** Con este Slider se puede modificar el valor de umbralización de la imagen. **d)** Vuelve al valor por defecto del umbral(150). **e)** Se detiene la captura y se guardan los datos. **f)** Botón que se agregó para la validación del algoritmo.



**Fig. 24** Resultado que se busca obtener al realizar la calibración.



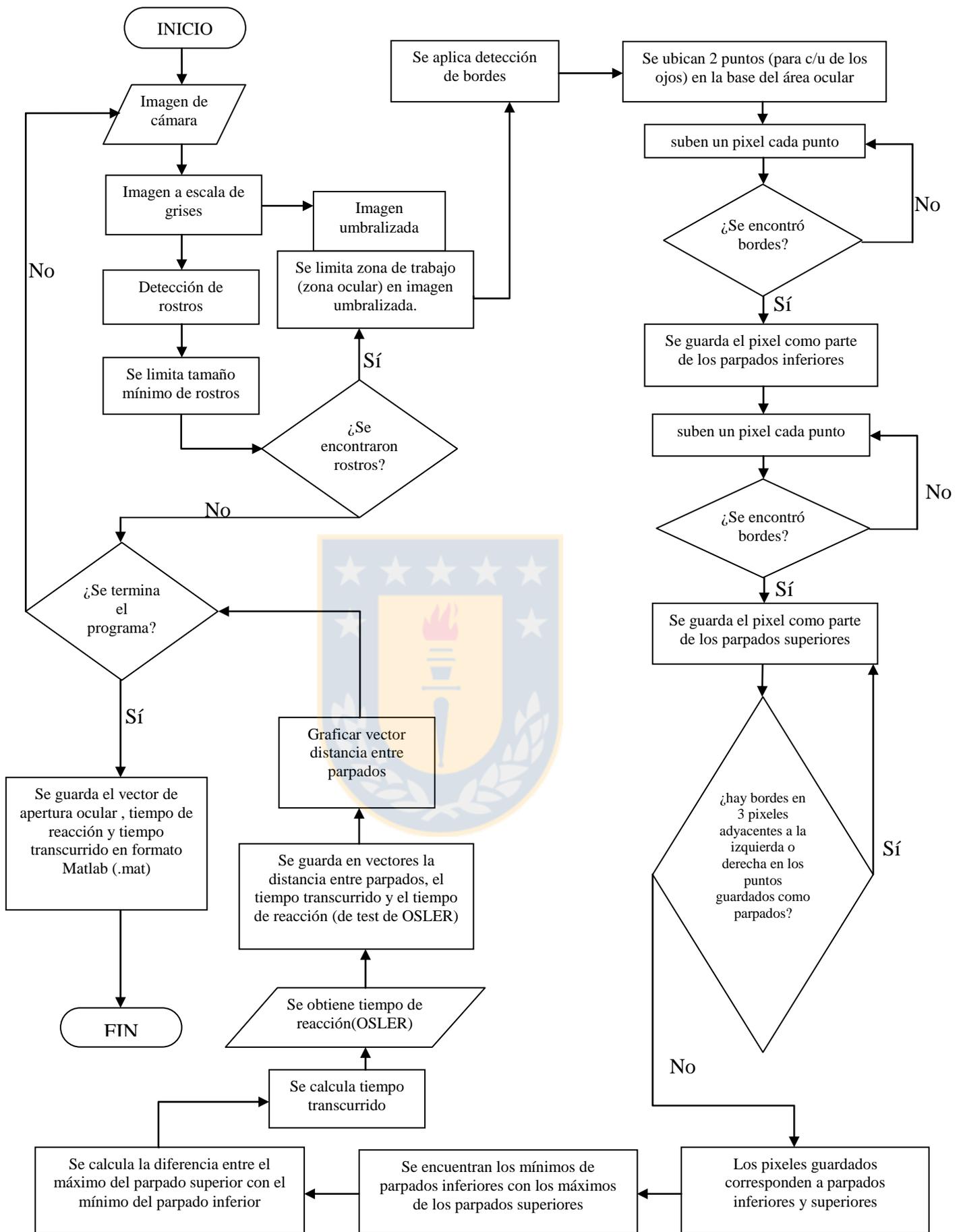
**Fig. 25** Plataforma interactiva de guardado, aquí se agrega el nombre final del archivo.

Finalmente se agregó una ventana que al iniciar requiere el nombre con el que se guardarán los datos (Figura 25). De este programa finalmente se retorna los vectores de tiempo y apertura ocular para su trabajo en Matlab (.mat). El diagrama de flujo de este programa se ve en la Figura 26.

El tiempo de ejecución del programa entre imágenes es de un promedio de 121 ms, considerando que el promedio de frecuencia de pestañeo es de 19,86 parpadeos por minuto [33] (lo que se traduce en un promedio de un pestañeo cada 3,02 segundos) y que un pestañeo reflejo dura 250 ms [33] el sistema no tendría limitantes para capturar el cierre ocular pero sí los tendrá a la hora del cálculo del tiempo del pestañeo.

### 4.3.2 Algoritmo de definición de parámetros oculares (Matlab)

De las mediciones realizadas se obtuvieron 3 vectores, uno de tiempo y otros dos de apertura ocular para el ojo izquierdo y derecho. En la Figura 27, se muestra una pequeña sección ejemplo del vector de apertura ocular.



**Fig. 26 Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición en Python**

Los vectores de apertura ocular de ojo izquierdo y derecho se trabajan por separado pero con el mismo procedimiento. De este algoritmo se obtiene la detección de inicio de pestañeo, reconocido como el flanco de bajada (Figura 27.a); el término de pestañeo identificado en el flanco de subida (Figura 27.b), tiempo entre pestañeos (tiempo transcurrido entre flanco de subida y bajada) y duración del pestañeo (tiempo entre flanco de bajada y de subida).

El algoritmo se trabaja a partir de una bandera que señala cuando se ha detectado un flanco de bajada (inicio de pestañeo) sin detectar otro de subida. Mientras esta bandera tiene valor lógico de falso, el tiempo transcurrido se cuenta como periodo transcurrido entre pestañeos. En esta condición se busca además el inicio del pestañeo, para esto se ve si la diferencia de valor (Figura 27.c) es mayor o igual a 4 entre alguno de los últimos 3 puntos del vector con pendiente negativa. Mientras que si se está corriendo en condición de que el último flanco encontrado fue el de bajada (bandera positiva) entonces el siguiente flanco que se busca es el de subida el que al igual que en la búsqueda del de bajada se consideran los últimos 3 puntos, donde si se da un aumento de valor superior o igual a 4 entre alguno de estos tres puntos se considera entonces como fin de pestañeo, por lo que el tiempo transcurrido se considera como duración del pestañeo. De este algoritmo se obtiene un vector de marcas de inicio y otro con el fin de los pestañeos, además de otros dos que registran el tiempo entre pestañeos y la duración de estos para ojos izquierdos y derecho por separado.



**Fig. 27 Sección de vector de apertura ocular.** a) Flanco de bajada que se reconoce como un cierre ocular (inicio de pestañeo). b) Flanco de subida que se reconoce como apertura ocular (fin del pestañeo). c) Diferencia entre valor máximo y mínimo que se evalúa para la detección de apertura y cierre de los ojos.

### 4.3.3 Algoritmo para la validación de la detección de parámetros oculares. (Matlab)

Para la validación del funcionamiento del sistema logrado, se realizó una modificación al programa, agregando un botón (Figura 23.f) para marcar los pestañeos, que es el evento que determina los parámetros oculares. Así entonces, cada vez que se realizaba un pestañeo se apretó el botón, marcando el momento en que sucedió. Esto se llevó a cabo con 523 pestañeos.

Una vez hecha la medición, se llevaron los datos a Matlab para realizar el trabajo estadístico con el que se pudo evaluar el funcionamiento del programa.

Para la validación se usó el vector de marcas de pestañeos que se obtiene del acuse del botón agregado en la plataforma de medición de Python, junto con los vectores de inicio de pestañeos que se obtiene del algoritmo en Matlab de detección de pestañeos para el ojo izquierdo y derecho, dado que es el vector que tiene el resultado del sistema en su conjunto.

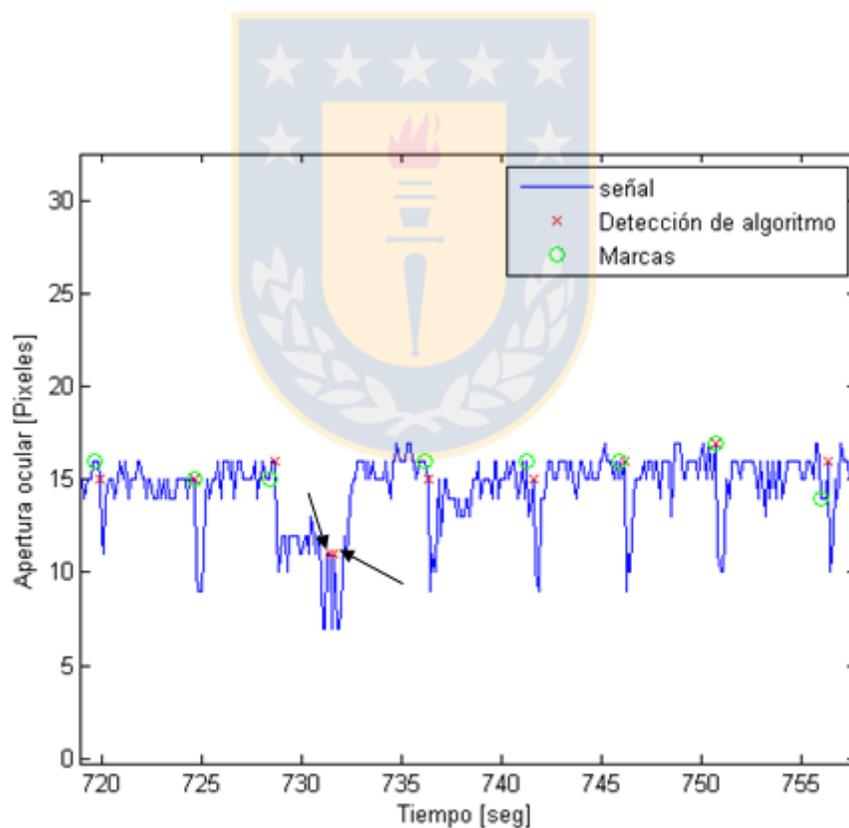
Del vector de marcas de pestañeos hecho en la medición se busca si se encuentra ese punto o uno cercano en los vectores resultantes del algoritmo de definición de parámetros oculares, considerando un desfase natural entre el pestañeo y el apriete del botón de 500 ms, siendo mayor al tiempo de reacción promedio para a un estímulo visual y menor que el tiempo promedio entre pestañeos. Se definieron como verdaderos positivos (VP) los que son encontrados, como falsos negativos (FN) los pestañeos marcados que no fueron distinguidos por el algoritmo y como falsos positivos (FP) los que el algoritmo detectó como pestañeo pero no fueron marcados en la medición. Por ser eventos en el tiempo los que se detectan, no se consideran los verdaderos negativos [34]. Los cálculos se presentan en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se observa que entre la aplicación del algoritmo entre el ojo izquierdo y el ojo derecho solo se encuentra una diferencia de un 7,23% entre los VP, obteniendo en el peor de los casos (ojo derecho) el 83,36% de los pestañeos. Pero se encuentra una importante diferencia entre los FP encontrados para cada ojo, esta es casi 8 veces mayor para el ojo derecho. Viendo las señales (Figura 28 y Figura 29) se observa que los falsos positivos se presentaron debido al ruido que tenían las señales donde en el ojo derecho era mayor, lo que tiene correlación con los resultados. Calculando la varianza [35] a los vectores del ojo izquierdo y derecho de la apertura ocular, resulta 2,95 y 8,20 pixeles respectivamente, donde se nota una dispersión 2,77 veces mayor para la señal del ojo derecho, respaldando la mayor cantidad de ruido en este vector, y por consecuencia mayor error en el funcionamiento del algoritmo.

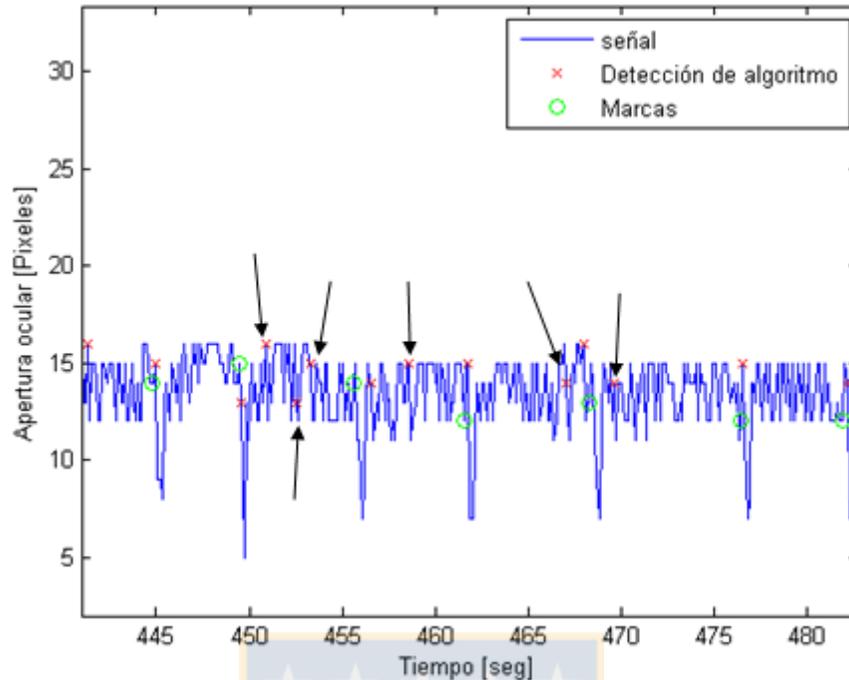
Ese ruido se dio porque disminuyó la intensidad de la iluminación por agotamiento de las pilas con las que se alimentaban las linternas infrarrojas, razón por la que se cambió la alimentación de la iluminación directamente a la red eléctrica.

**Tabla 4: Resultado del conteo de marcas de pestañeos versus los encontrados por el algoritmo para la validación del mismo.**

	FN	FP	VP	Se	+P
Ojo Izquierdo	53	28	470	0,8987	0,9438
Ojo Derecho	87	219	436	0,8337	0,6656



**Fig. 28** Sección de la medición de apertura ocular del ojo izquierdo, donde se muestra el resultado del algoritmo de detección de pestañeos versus las marcas realizadas. Se señalan por medio de las flechas los FP arrojados. Se observó que esta señal arroja pocas y breves zonas con estos ruidos.



**Fig. 29** Sección de la medición de apertura ocular del ojo derecho, donde se muestra el resultado del algoritmo de detección de pestaños versus las marcas realizadas. Se señalan por medio de las flechas los FP arrojados. Se observó que esta señal a diferencia de la del ojo izquierdo arroja mayor cantidad de zonas y más extensas con estos ruidos.

Para realizar una mejor evaluación se calculó la Sensibilidad ( $Se$ ) y la Predictibilidad Positiva ( $+P$ ), que son la capacidad de detectar el evento (pestaño) y la capacidad de rechazar falsos eventos respectivamente [35]. Su cálculo se realiza a partir de de las fórmulas (5) y (6).

$$Se = \frac{VP}{VP+FN} \quad (5)$$

$$+P = \frac{VP}{VP+FP} \quad (6)$$

De la Tabla 4 se aprecia una alta sensibilidad, se concluye entonces una buena capacidad de de detección de los eventos. Pero al momento de evaluar la predictibilidad positiva, dependiente de los falsos positivos se observa una importante disminución en el ojo derecho, la cual como se mencionó anteriormente era una señal con alta cantidad de ruido. De esto se concluye que el

algoritmo tiene un buen comportamiento, pero el sistema presenta alta sensibilidad a la luz, la cual produce ruido en el cálculo de distancia entre párpados (apertura ocular). Esta sensibilidad a la luz también se reporta en los sistemas similares que se encuentran en desarrollo [5].

Por lo tanto se cuenta con las herramientas necesarias para poder hacer un estudio preliminar del comportamiento de los parámetros oculares respecto del estado de vigilia

#### **4.3.4 Algoritmo test de OSLER. (Arduino)**

El microcontrolador enciende una luz roja en un tiempo aleatorio entre 3 y 7 segundos, desde ese momento se calcula el tiempo que tarda en apretarse el pulsador, tiempo definido como el de reacción, el que es enviado al puerto USB, información recibida por el algoritmo de detección de apertura ocular (en Python) para sincronizar los datos. Al presionar el pulsador se apaga la luz roja y se enciende el led verde, solo al cesar el apriete del pulsador se apaga la luz verde y comienza de nuevo el tiempo aleatorio para el encendido de la luz roja. Si se presiona el pulsador antes que pase el tiempo aleatorio para encender la luz roja, se reinicia el tiempo de espera de encendido de la luz, para evitar que se disminuya el tiempo de reacción por un intento de adivinar del sujeto de prueba.

Además el tiempo entre encendidos de la luz roja es aleatorio con el fin de evitar que se disminuya el tiempo de reacción de apriete del pulsador por realizar un cálculo de tiempo de parte del sujeto de prueba, el que se facilita por el aprendizaje que se genera ante la repetición continua de una tarea a tiempo constante. Con lo anterior se busca evitar la mayor cantidad posible de variables que pueden intervenir en el tiempo de reacción, dándole mayor importancia a la incidencia que tiene en él la somnolencia. El diagrama de flujo del algoritmo se observa en la Figura 30.

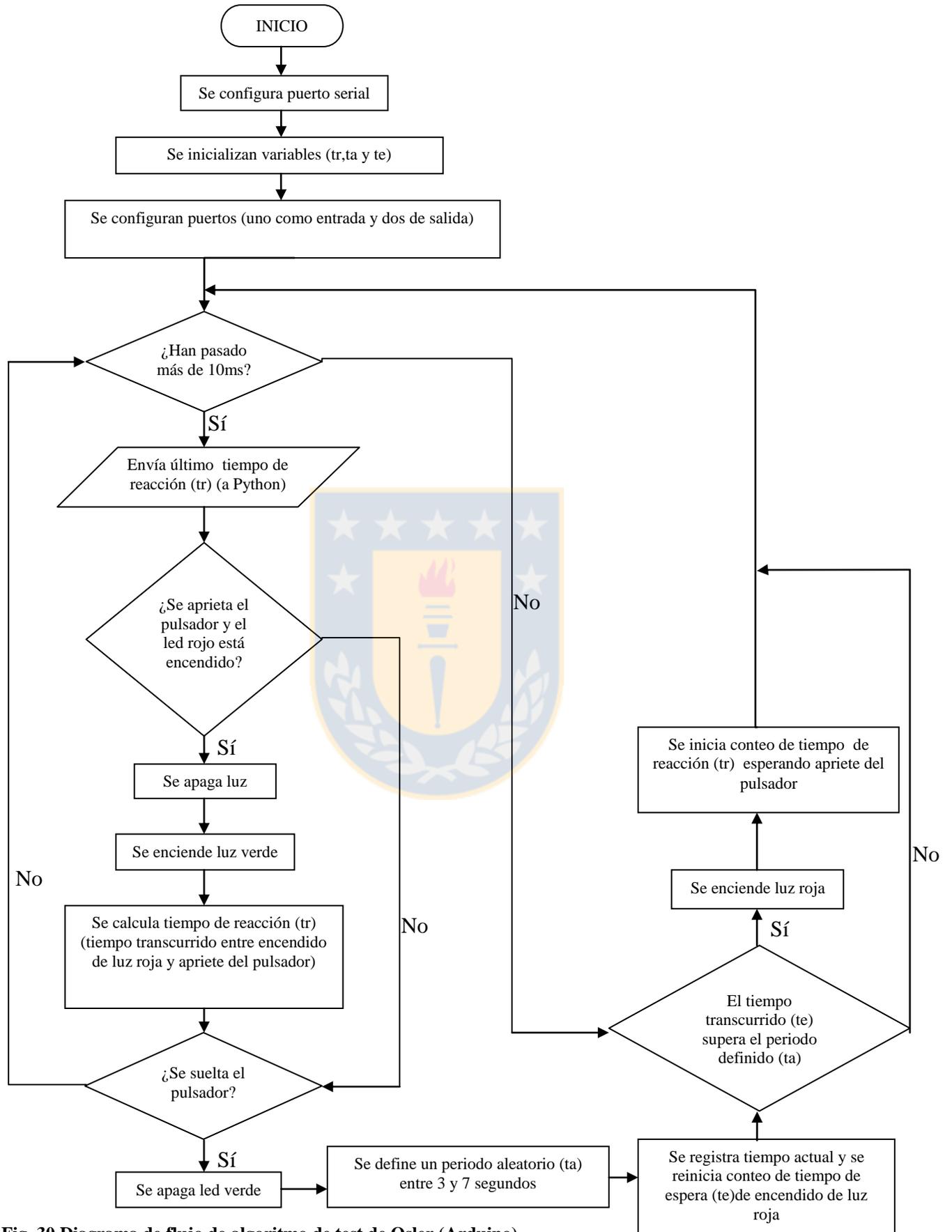


Fig. 30 Diagrama de flujo de algoritmo de test de Osler (Arduino).

## **5. Análisis de parámetros oculares respecto a la vigilia**

Se midieron 4 sujetos voluntarios. De cada medición se tienen 4 vectores, vector de tiempo de reacción, vector de tiempo transcurrido, y vectores de apertura ocular para el ojo izquierdo y derecho. De los vectores de apertura ocular para el ojo izquierdo y derecho se obtienen además los vectores del tiempo total en que los ojos están cerrados en un minuto (AVECLOS), duración y frecuencia de los pestañeos. Con estos vectores se busca la relación entre: AVECLOS, duración de pestañeos y frecuencia de pestañeos con respecto al tiempo de reacción. Recordemos que el tiempo de reacción, como se mencionó anteriormente es una variable relacionada con el cansancio, además de ser una variable que al aumentar disminuye el potencial desempeño en la conducción [6].

Debido a la constante presencia de pestañeos, no es la frecuencia de pestañeo, duración de pestañeo ni AVECLOS instantáneo el que se desea realizar, sino la tendencia del comportamiento de estas variables. Para lo anterior, los vectores de duración de pestañeo, frecuencia de pestañeo, AVECLOS y tiempo de reacción fueron filtrados por un filtro mediana mediana (evitando que eventos erróneos, ya sean excedentes o faltantes generen grandes alteraciones en los datos) con una ventana de 4 min, ya que es un tiempo suficiente para determinar una tendencia del comportamiento de las variables, pero es solo la tercera parte de la latencia del sueño para una persona sin alteraciones del sueño [36]. Posteriormente se realizó un suavizado con un filtro media, con una ventana de 2 min.

### **5.1. Aplicación de criterio de Correlación**

Buscando una relación lineal, para cada uno de los sujetos, se aplicó el criterio de correlación existente entre:

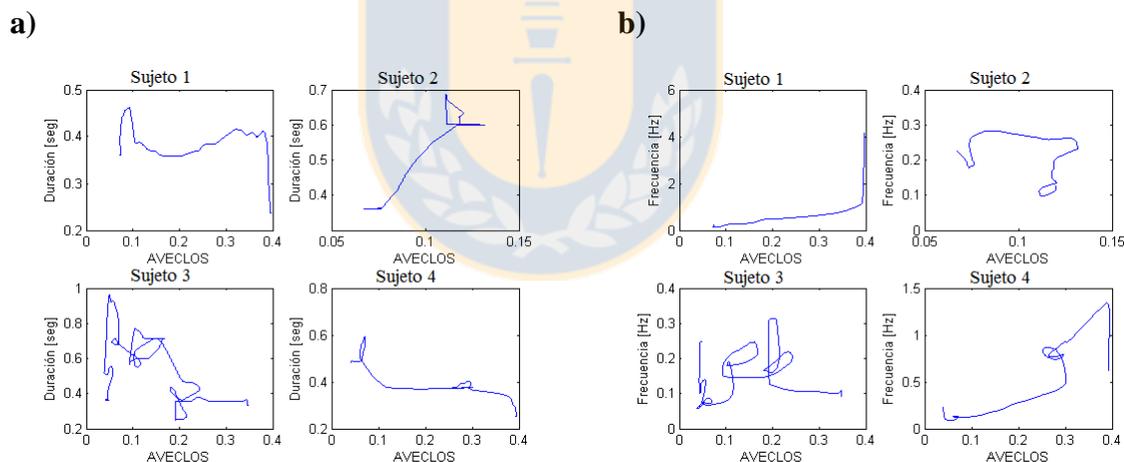
- Tiempo de reacción y duración de pestañeos.
- Tiempo de reacción y frecuencia de pestañeos.
- Tiempo de reacción y AVECLOS.

En la Tabla 5 se observa que para la duración de pestañeo existe una fuerte correlación negativa para el sujeto 4, pero que no es común para todos, donde incluso el sujeto 2 muestra una fuerte correlación positiva (Figura 31.a). En el caso de la frecuencia de pestañeo muestra una correlación fuerte positiva para el sujeto 1 y 4, pero muy baja e incluso negativa para los sujetos 3 y

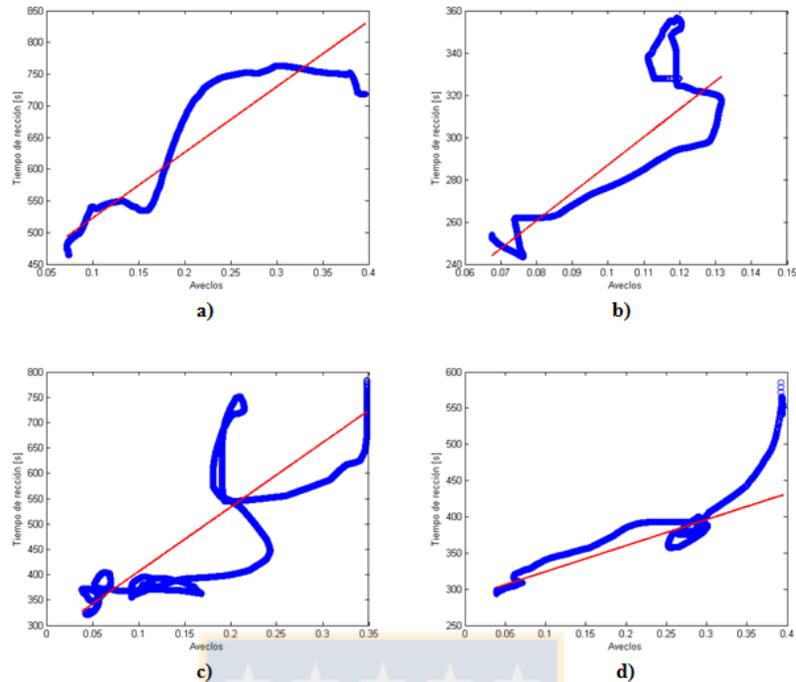
2 respectivamente (Figura 31.b). Cualquiera de esas variables, al menos por si solas, no nos permite estimar el estado de vigilia. Finalmente en la tabla 5 se observa que la correlación entre tiempo de reacción y AVECLOS para los 4 sujetos es superior a 0,77. Lo anterior se confirma al ver las graficas de la Figura 32, donde se muestran las relaciones de las variables además de la recta que se generan por método de regresión entre estas. Así entonces, a mayor tiempo de reacción, condición que nos indica mayor fatiga, mayor es la cantidad de tiempo que nuestros ojos permanecen cerrados.

**Tabla 5: del cálculo de correlación entre el tiempo de reacción y los parámetros oculares.**

	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4
Tiempo de reacción vs Duración de pestaños	-0,3010	0,9269	-0,5875	-0,8148
Tiempo de reacción vs Frecuencia de pestaños	0,7462	-0,3033	0,1654	0,8148
Tiempo de reacción vs AVECLOS	0,9127	0,8822	0,7710	0,9135



**Fig. 31 a) Gráfica de relación entre AVECLOS y duración de pestaño. b) Gráfica de relación entre AVECLOS y frecuencia de pestaño.**



**Fig. 32** Grafica de relación entre AVECLOS y tiempo de reacción, con la recta resultante de la regresión según correlación. a) Sujeto 1. b) Sujeto 2. c) Sujeto 3. d) Sujeto 4.

## 5.2. AVECLOS para tiempos de reacción anormales

Según [37], el tiempo de reacción para un estímulo visual promedio es 0,311 seg y 0,354 seg para hombres y mujeres respectivamente, con una desviación estándar de 0,060 seg y 0,067 seg para cada género (Tabla 6). Considerando una distribución normal, se tiene que la media  $\pm 2$  SD contiene al 95 % de la población, por lo que fuera de este rango se supone un tiempo de reacción anormal. Por lo tanto valores superiores a 0,431 seg para los hombres y 0,488 seg para las mujeres (Tabla 6), son valores elevados y atípicos. Como se ha expuesto a lo largo de este trabajo, el tiempo de reacción está directamente relacionado con el estado de vigilia, por lo que valores altos en aquella variable se traducen en un estado de vigilia disminuido.

Con el fin de evaluar los valores de AVECLOS donde el tiempo de reacción es atípicamente alto, se marcó el umbral de valor atípico en el vector de tiempo de reacción, y el correspondiente valor de AVECLOS.

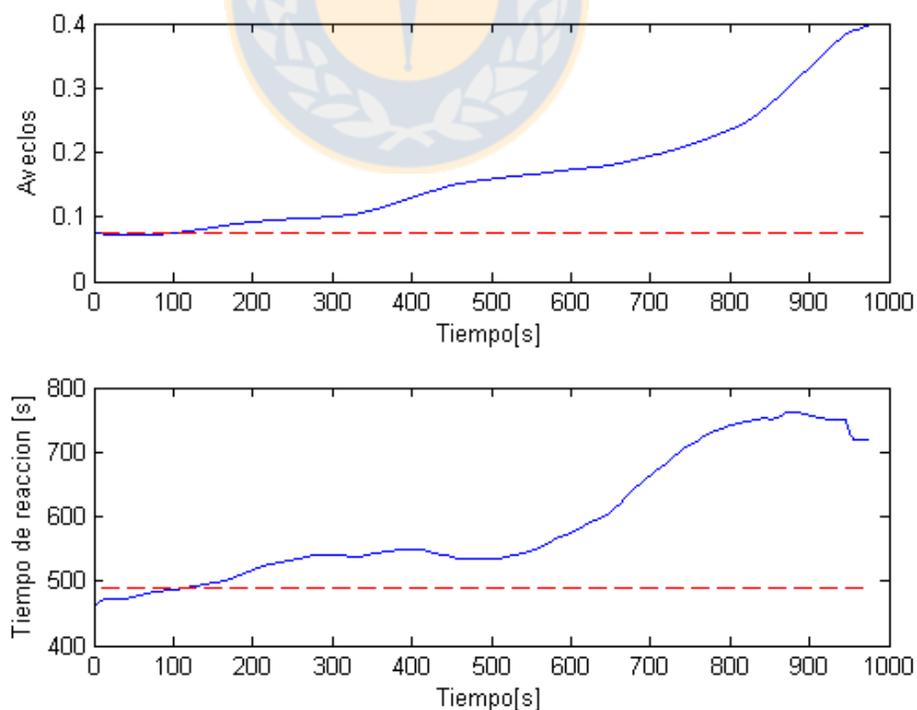
En la Figura 33 se muestran los vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 1. Este sujeto es de sexo femenino, por lo tanto el umbral en el tiempo de reacción se ubica en los 488 ms. Aquí se puede concluir que el sujeto tuvo un estado de vigilia disminuido desde el

comienzo de la medición, el cual disminuye paulatinamente. En el tiempo de reacción se detectan dos pendientes importantes, misma cantidad que para la variable AVECLOS, observando que estas variables se corresponden corroborando la correlación que anteriormente se mostró tenían.

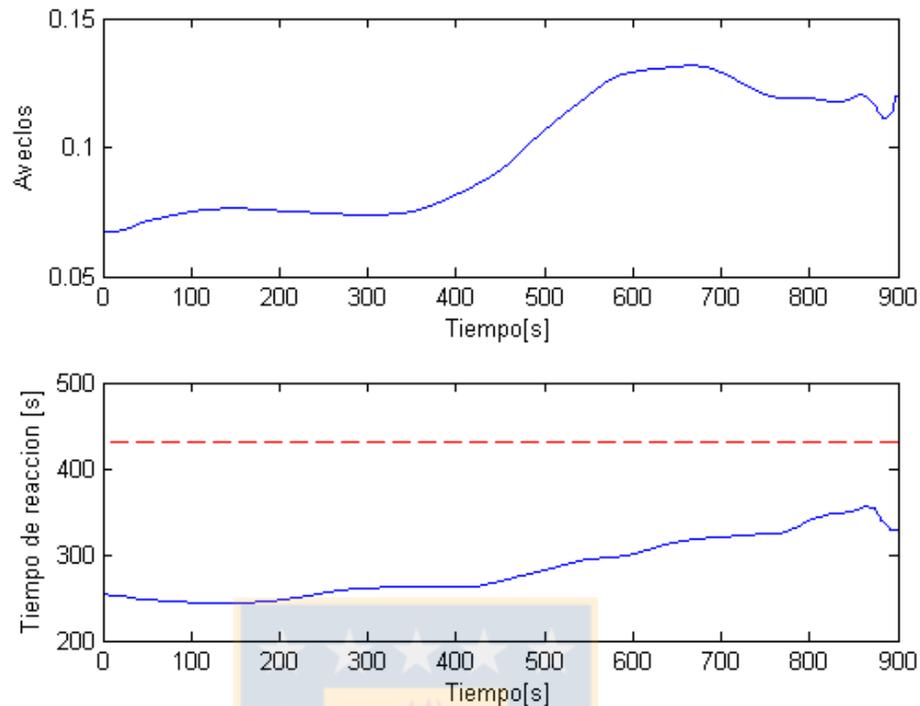
En la Figura 34 donde se muestra los vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 2, de sexo masculino por lo que el umbral se ubicó en los 431 ms, se observa que el tiempo de reacción en ningún momento presentó un valor atípico, permitiendo concluir que el sujeto en realidad no presentó cansancio, dando por terminada la medición antes que terminara su tiempo de reacción. Para el resto de los sujetos se observa que la variable de AVECLOS llegan a un valor de 0,4 aproximadamente con el cansancio (Figuras 33, 35 y 36), lo que confirma que el sujeto pudo haber terminado la prueba por una razón diferente al cansancio.

**Tabla 6: Media, desviación estándar, y limite superior e inferior del tiempo de reacción para el 96 % de la población.**

Genero	Media [seg]	Desviación estándar (SD).	Rango 96% (media - 2* SD) -(media + 2* SD)
Hombre	0,311	0,060	0,191-0,431
Mujer	0,354	0,067	0,220-0,488



**Fig. 33 Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 1, este sujeto es de sexo femenino, por lo tanto el umbral de valores atípicos en el tiempo de reacción se ubica en los 488 ms. Se aprecia que el sujeto desde el comienzo de la medición presenta un estado de vigilia disminuido.**



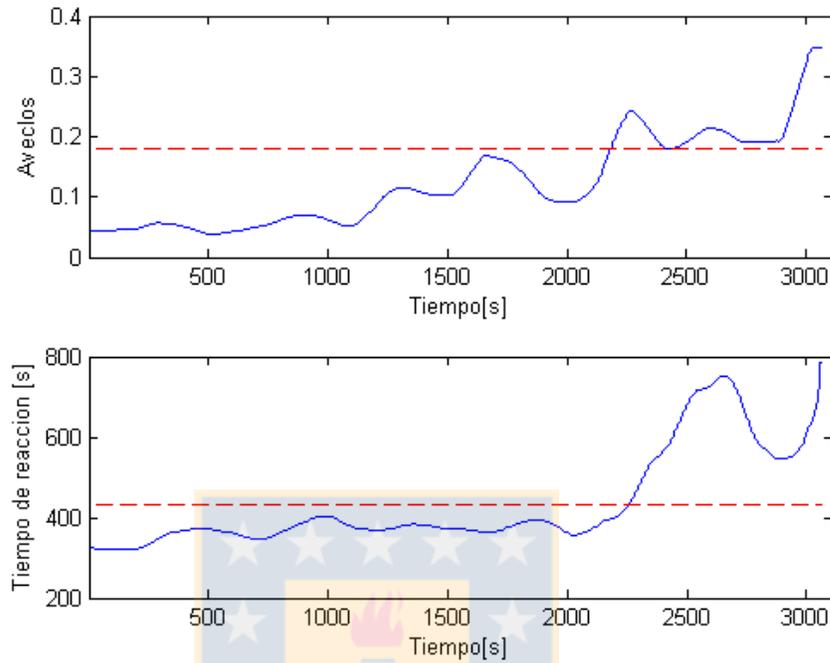
**Fig. 34** Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 2 . Se observa que el sujeto nunca superó el umbral de tiempo de reacción atípico. El vector de de la variable AVECLOS se mantiene por debajo de 0,15.

En la Figura 35 se muestran los vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 3, también de sexo masculino por lo que el umbral se ubicó en los 431 ms. Primero se observa que las 3 pendientes de aumentos que se detectan en el tiempo de reacción, tienen su homólogo en AVECLOS. Además, durante los periodos de tiempo de reacción elevados, el valor mínimo de AVECLOS supera a los demás valores de AVECLOS en los periodos de tiempo de reacción normales.

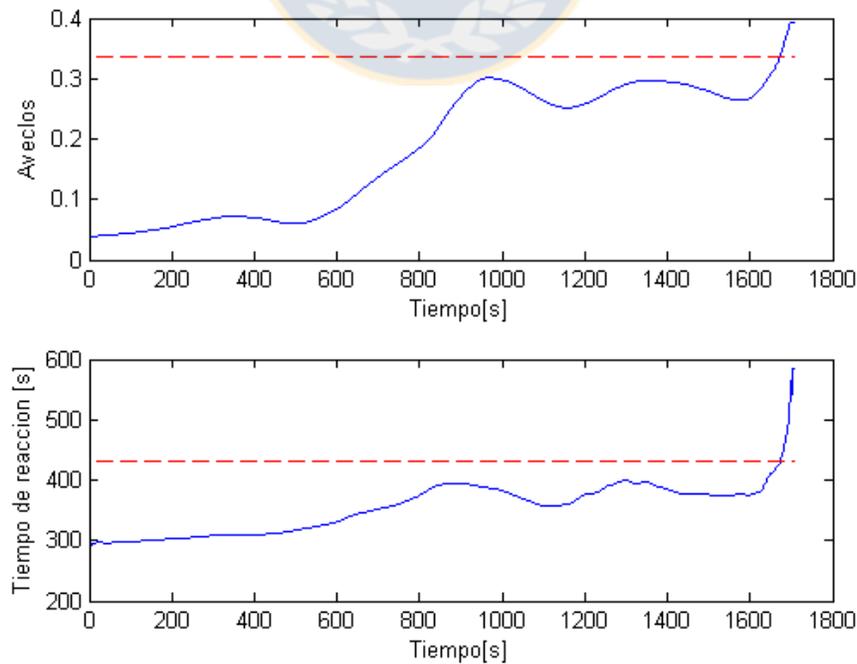
Finalmente en la Figura 36 se muestra los vectores de AVECLOS y tiempo de reacción para el sujeto 4, de sexo masculino por lo que el umbral se ubicó en los 431 ms. En esta figura se aprecia que solo al final el sujeto supera el umbral de valor atípico, momento desde donde se observan los valores más altos también de la variable AVECLOS.

En resumen, se observa que durante los periodos de tiempo de reacción elevados, el mínimo valor de AVECLOS supera el máximo de los valores de esta variable donde el tiempo de reacción es normal. En la medición donde no se superó el umbral del tiempo de reacción, la variable de AVECLOS no superó el 0,15 mientras que para el resto de los sujetos para altos tiempo de reacción se alcanzaban valores de 0,4 en esta variable. Finalmente se observó que cada pendiente de aumento

brusco encontrada para la variable de tiempo de reacción en el rango de sus valores atípicos fue correspondido con un aumento brusco en la variable de AVECLOS



**Fig. 35** Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 3. Se observa que una vez superado el umbral en tiempo de reacción, en AVECLOS se presenta también un aumento sin volver a valores previos a la superación del umbral.



**Fig. 36** Vectores de AVECLOS y tiempo de reacción, para el sujeto 4. Se observa que solo al final se supera el umbral en tiempo de reacción, aumento rápido que se tiene también en AVECLOS.

### 5.3. Propuesta de detección de somnolencia a partir de AVECLOS.

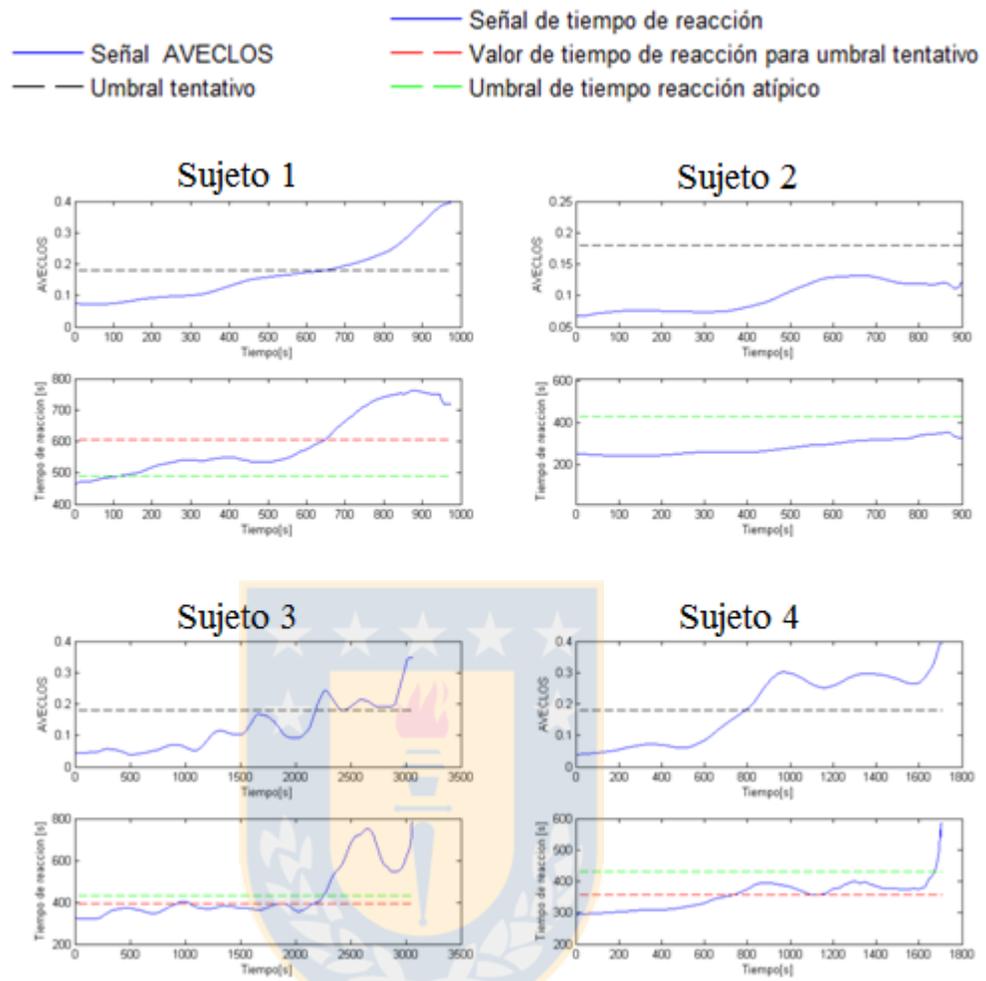
La alta correlación existente entre el tiempo de reacción y AVECLOS permite pensar en AVECLOS como una herramienta para predecir un estado de vigilia reducido, condición de riesgo para realizar algunas tareas como conducir. En la Tabla 7, se observa el valor mínimo que posee el vector de AVECLOS donde el tiempo de reacción es atípicamente alto. Se propone como umbral tentativo de AVECLOS 0,18 para detectar fatiga.

En la Figura 37 se observa el resultado del umbral tentativo. Se marcó en AVECLOS el umbral de 0,18 y en el tiempo de reacción el valor mínimo encontrado en las regiones donde AVECLOS supera el umbral (recta roja en tiempos de reacción), para compararlo con el valor límite de tiempo de reacción atípicamente elevado (recta verde en tiempo de reacción). Se obtuvo que para el primer sujeto, de género femenino, el umbral tentativo corresponde a un tiempo de reacción mínimo de 647 ms, que es 159 ms mayor al tiempo de reacción elevado, lo que podría significar que se requiere de un umbral más bajo. En el caso del sujeto 2, AVECLOS no supera el umbral tentativo lo que responde a que en el tiempo de reacción no se observen tampoco valores por sobre los 431 ms, que es el valor considerado alto para una reacción a un estímulo visual para un sujeto de género masculino. Finalmente para el sujeto 3 y 4 se tienen tiempos de reacción 34 ms y 74 ms respectivamente, menos que el tiempo de reacción considerado atípicamente elevado, lo que sería una alerta temprana, cercana a un valor de riesgo de tiempo de reacción.

Para confirmar o modificar el umbral tentativo, junto con otras consideraciones que se deban tener como un umbral diferente para cada género, o que se deba hacer una medición para personalizarlo, se requiere un mayor número de mediciones, para lo este trabajo entrega las herramientas tanto de hardware como de software.

**Tabla 7: Se muestra el umbral de tiempo de reacción excesivo para cada sujeto según su género y el valor mínimo de AVECLOS una vez que se supera el umbral.**

	Umbral de tiempo de reacción	Valor min. de AVECLOS con: tiempo de reacción > umbral
Sujeto 1	488	0,0762
Sujeto 2	431	-----
Sujeto 3	431	0,1807
Sujeto 4	431	0,3360
	Promedio	<b>0,1976</b>



**Fig. 37** Resultado de la aplicación de un umbral de AVECLOS tentativo para la detección de fatiga en los 4 sujetos

## 6. Conclusiones

---

### 6.1. Conclusiones

Se obtuvieron datos dispares en la correlación entre el tiempo de reacción respecto a la duración y frecuencia de pestañeo, pero fue muy distinto entre el tiempo de reacción y AVECLOS, donde la correlación más baja fue de 0,771, con lo que se aceptó existía un grado importante de relación lineal directa entre ambas variables. Esto permite asociar el tiempo total en que los ojos permanecen abiertos en un minuto con el estado de vigilia.

Al evaluar el comportamiento que poseía la variable AVECLOS para valores atípicos del tiempo de reacción, se observó que los valores son mayores y no se comparten con el grupo de datos previo a la superación del umbral. En la medición que no se superó el umbral, también se mantuvo baja la variable AVECLOS, no superando los 0,15 mientras que en el resto de las mediciones se rodeo el 0,4. Por lo que no solo se habla de que existe una correlación de las variables, sino que además se concluye que para valores atípicos del tiempo de reacción se tienen también valores atípicos de la variable AVECLOS.

En este trabajo se presenta 0,18 como un valor de umbral tentativo para AVECLOS, el cual nos permita determinar un estado de vigilia disminuido tras asociarlo con el tiempo de reacción, pero es importante realizar más mediciones para poder confirmar o modificar el valor o condición.

Se logró un sistema que permitió obtener los parámetros oculares a partir de una cámara web básica para estimar el estado de vigilia. Ésta se modificó para trabajar en el espectro infrarrojo, cambiando el filtro de luz original por emulsión fotográfica. El dispositivo tiene un costo total aproximado de 5 dólares. Los dispositivos existentes en el mercado que evalúan el estado de vigilia por medio de una cámara, poseen valores desde 1.500 dólares hasta incluso 30.000 dólares, logrando una importante ventaja económica en este trabajo.

### 6.2. Trabajo Futuro

Con este trabajo se avanza a una solución para el problema de los accidentes provocados por el agotamiento de los conductores, ya que quedan las puertas abiertas para diseñar un sistema de alerta temprana al agotamiento en conductores a través de la relación entre la variable de AVECLOS y el estado de vigilia encontrada.

Con la herramienta que aquí se presenta se debe llevar a cabo un mayor número de mediciones para confirmar o modificar el umbral aquí presentado, o si es necesario tener otras consideraciones respecto a éste como diferenciar uno para hombres y mujeres o realizar mediciones para definir uno individual, que nos permita predecir un estado de vigilia reducido. Para lo anterior se debe solucionar el problema del control de la luz, llevar el procedimiento de análisis aquí presentado a tiempo real y determinar las medidas a tomar en caso de la detección de la fatiga de los conductores.



## Bibliografía

- [1] R. Acevedo, J. Rosales. "Carabineros, Informe anual 2012", Instituto Nacional de Estadísticas(INE), Departamento estadísticas de hogares; sub departamento Estadísticas. Periodo de información correspondiente al periodo 2012. Accidentes y accidentados en el transito, pp. 271-308, 5 de septiembre de 2013..
- [2] Ministerio de transportes y telecomunicaciones (Diciembre 2014). "Transporte carretero | Observatorio logistico". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <http://estadisticatransporte.mtt.cl/transporte-carretero-observatorio-logistico.html>
- [3] Consejo Minero (Abril 2015). "Minería en Cifras". Accessed: 20 Octubre 2015 [Online]. Disponible [http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2015/05/Miner%C3%ADa-en-Cifras\\_0415.pdf](http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2015/05/Miner%C3%ADa-en-Cifras_0415.pdf)
- [4] CONECIF CHILE, Corporación Nacional de Estudiantes de Ciencias Forestales (29 de Septiembre 2013). "La importancia del sector Forestal". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <http://conecif.webnode.cl/news/la-importancia-del-sector-forestal/>.
- [5] Edwards, D., Aguirre, A., Davis, B., Dawson, T., & Trutschel, U. (2008). Operator Fatigue: Detection Technology Review.
- [6] Ting, P. H., Hwang, J. R., Doong, J. L., & Jeng, M. C. (2008). Driver fatigue and highway driving: A simulator study. *Physiology & Behavior*, 94(3), 448-453.
- [7] Paul, A., Boyle, L. N., Tippin, J., & Rizzo, M. (2005, June). Variability of driving performance during microsleeps. In *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 433-440).
- [8] Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C., & Bioulac, B. (2005). Fatigue, sleep restriction and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 473-478.
- [9] Smith, S., Sullivan, K., Hopkins, W., & Douglas, J. (2004). Frequency of insomnia report in patients with obstructive sleep apnoea hypopnea syndrome (OSAHS). *Sleep medicine*, 5(5), 449-456.

- [10] Badran, M., Ayas, N., & Laher, I. (2014). Insights into obstructive sleep apnea research. *Sleep medicine*, 15(5), 485-495.
- [11] Young, T., Palta, M., Dempsey, J., Skatrud, J., Weber, S., & Badr, S. (1993). The occurrence of sleep-disordered breathing among middle-aged adults. *New England Journal of Medicine*, 328(17), 1230-1235.
- [12] Lacasse, Y., Godbout, C., & Series, F. (2002). Health-related quality of life in obstructive sleep apnoea. *European Respiratory Journal*, 19(3), 499-503.
- [13] Teran-Santos, J., Jimenez-Gomez, A., & Cordero-Guevara, J. (1999). The association between sleep apnea and the risk of traffic accidents. *New England Journal of Medicine*, 340(11), 847-851.
- [14] Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Fatigue and individual differences in monotonous simulated driving. *Personality and individual differences*, 34(1), 159-176.
- [15] ABC Tecnología (2 Diciembre 2013) . "Inventan un dispositivo para mantener despiertos a los conductores". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <http://www.abc.es/tecnologia/informatica-hardware/20131202/abci-fujitsu-sensor-mantener-despierto-201312021724.html>
- [16] BBC Mundo, Tecnología (10 Diciembre 2013), "¿Cómo evitar que los conductores se queden dormidos al volante?". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: [http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2013/12/131210\\_tecnologia\\_camiones\\_prevenir\\_accidentes\\_il.shtml](http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2013/12/131210_tecnologia_camiones_prevenir_accidentes_il.shtml).
- [17] Gay, P., Weaver, T., Loubé, D., & Iber, C. (2006). Evaluation of positive airway pressure treatment for sleep related breathing disorders in adults. *SLEEP-NEW YORK THEN WESTCHESTER-*, 29(3), 381.
- [18] Häkkinen, H., Summala, H., Partinen, M., Tiihonen, M., & Silvo, J. (1999). Blink duration as an indicator of driver sleepiness in professional bus drivers. *Sleep*, 22(6), 798-802.
- [19] Diario el día (15 Junio 2012), "Joven que manejaba retroexcavadora fallece aplastado en Algarrobito". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <http://diarioeldia.cl/articulo/joven-que-manejaba-retroexcavadora-fallece-aplastado-algarrobito>.

- [20] C. de Andrés, J. Vaqué, *Ciencia Inquiet* (2 de Diciembre 2013). "El ojo humano ¿Cómo funciona?". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible en: <http://cienciainquieta.com/2013/12/02/el-ojo-humano-como-funciona/>
- [21] (Mayo 2011) La relación, "los Sentidos". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible en: <http://docentes.educacion.navarra.es/metayosa/1bach/rela7.html>.
- [22] E. Sirlin, "Física de la luz", Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Buenos Aires Argentina. 2006.
- [23] Vera, E. (2003). Corrección de No-Uniformidad en sistemas de Imágenes Infrarrojas. Informe de Tesis, Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción.
- [24] Association for Respiratory Technology & Physiology, *Sleep Disorders and Tests* (2013), "OSLES Test (Oxford Sleep Resistance Test). Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <http://www.artp.org.uk/en/patient/sleep-disorders-tests/osler.cfm>.
- [25] Arduino (2015). Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: <https://www.arduino.cc/>.
- [26] Bonnet, C. (1994). Psicofísica de los tiempos de reacción: teorías y métodos. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 26(3), 431-444.
- [27] LANFORD, M. (2001). *La fotografía paso a paso. Un curso completo*. Ed. Herman Blume. Madrid, Pagina:100, "Relleno de sombras".
- [28] (30 Noviembre 2014). Documentación Opencv, "Face Detection using Haar Cascades". Accessed: 20 Octubre 2015. [Online]. Disponible: [http://docs.opencv.org/trunk/doc/py\\_tutorials/py\\_objdetect/py\\_face\\_detection/py\\_face\\_detection.html](http://docs.opencv.org/trunk/doc/py_tutorials/py_objdetect/py_face_detection/py_face_detection.html).
- [29] Burgué, C. Jesús.(2012) *La Cara, sus Proporciones Estéticas*. Infomed Red de Salud de Cuba.La Habana, Cuba.
- [30] Esqueda, J., & Palafox, L. (2005). *Fundamentos de procesamiento de imágenes*. Baja California, México: Universidad Autónoma de Baja California.
- [31] Gila, L., Villanueva, A., & Cabeza, R. (2009). Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares. In *Anales del Sistema Sanitario de Navarra* (Vol. 32, pp. 9-26). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.

- [32] "Texto de Apoyo; Receptores y mecanismos neuromusculares periféricos", Universidad Andrés Bello, facultad de Odontología, Fisiología Oral.
- [33] Caffier, P. P., Erdmann, U., & Ullsperger, P. (2003). Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure. *European journal of applied physiology*, 89(3-4), 319-325.
- [34] Pino, E., Ohno-Machado, L., Wiechmann, E., & Curtis, D. (2005). Real-time ECG algorithms for ambulatory patient monitoring. In *AMIA Annual Symposium Proceedings* (Vol. 2005, p. 604). American Medical Informatics Association.
- [35] Sabadías, A. V. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial* (Vol. 8). Univ de Castilla La Mancha.
- [36] Carskadon, M. A., Dement, W. C., Mitler, M. M., Roth, T., Westbrook, P. R., & Keenan, S. (1986). Guidelines for the multiple sleep latency test (MSLT): a standard measure of sleepiness. *Sleep*, 9(4), 519-524.
- [37] Tejero, J. P., & Rojo-González, J. J. (2011). Estudio del tiempo de reacción ante estímulos sonoros y visuales. *Motricidad: revista de ciencias de la actividad física y del deporte*, (27), 149-162.

## Anexo A. Formulario de consentimiento

### FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO

Yo \_\_\_\_\_, he sido invitado(a) a participar en el proyecto "Estimación de estado de vigilia, a partir de imágenes de video". Entiendo que mi participación consistirá en ser voluntario(a) de una medición que busca evaluar y relacionar el comportamiento de los ojos con el estado de vigilia. He leído (o se me ha leído) la información del documento de consentimiento que explica el procedimiento a realizar. He tenido tiempo para hacer preguntas y se me ha contestado claramente. No tengo duda sobre mi participación.

Acepto voluntariamente participar y sé que tengo derecho a terminar mi participación en cualquier momento.

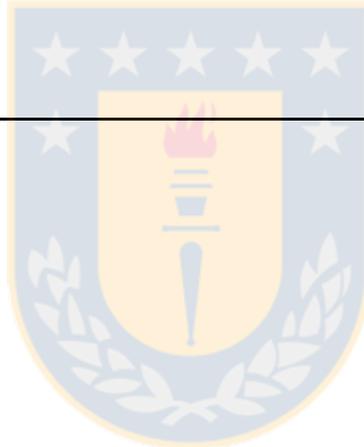
#### **Información del participante:**

Nombre: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_\_ años.

Sexo: \_\_\_\_M \_\_\_\_F

Firma: \_\_\_\_\_



#### **Información del Investigador Responsable:**

Nombre: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_