

Universidad Nacional de Mar del Plata  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Electrónica y Computación  
Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (LPI)  
Instituto de Investigaciones Científicas y  
Tecnológicas en Electrónica (ICyTE),  
UNMdP-CONICET

***“Detección de movimientos del  
globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de  
Imágenes para la interacción  
persona-computadora”***

Luciano José Di Iorio  
Matricula 10862/Legajo 5875

Directores: Dr. Ing. Diego Sebastián Comas  
Dr. Ing. Gustavo Javier Meschino

Proyecto Final. Ingeniería Electrónica.

Año: 2022



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Universidad Nacional de Mar del Plata  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Electrónica y Computación  
Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (LPI)  
Instituto de Investigaciones Científicas y  
Tecnológicas en Electrónica (ICyTE),  
UNMdP-CONICET

***“Detección de movimientos del  
globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de  
Imágenes para la interacción  
persona-computadora”***

Luciano José Di Iorio  
Matricula 10862/Legajo 5875

Directores: Dr. Ing. Diego Sebastián Comas  
Dr. Ing. Gustavo Javier Meschino

Proyecto Final. Ingeniería Electrónica.

Año: 2022

## Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que con su dedicación han colaborado permitiéndome lograr que este trabajo llegue a su fin, en especial:

- A mis directores, por su tiempo e inagotable paciencia y recursos brindados para la concreción de este trabajo, aun en tiempos de virtualidad;
- A mis amigos y compañeros de trabajo que con motivación y empatía acompañaron cada paso;
- A toda mi familia, especialmente a mi mujer e hija por la contención, compañía y empuje brindado en todo momento.

## Índice de contenido

Agradecimientos .....	1
Índice de contenido .....	2
Resumen .....	3
Capítulo 1. Introducción .....	5
Capítulo 2. Procesamiento Digital de Imágenes.....	10
Capítulo 3. Desarrollo e implementación.....	17
Capítulo 4. Resultados.....	29
Capítulo 5 Trabajo futuro.....	36
Capítulo 6. Conclusiones .....	41
Bibliografía.....	43
Apéndice I: Requerimientos y cronograma previsto .....	46

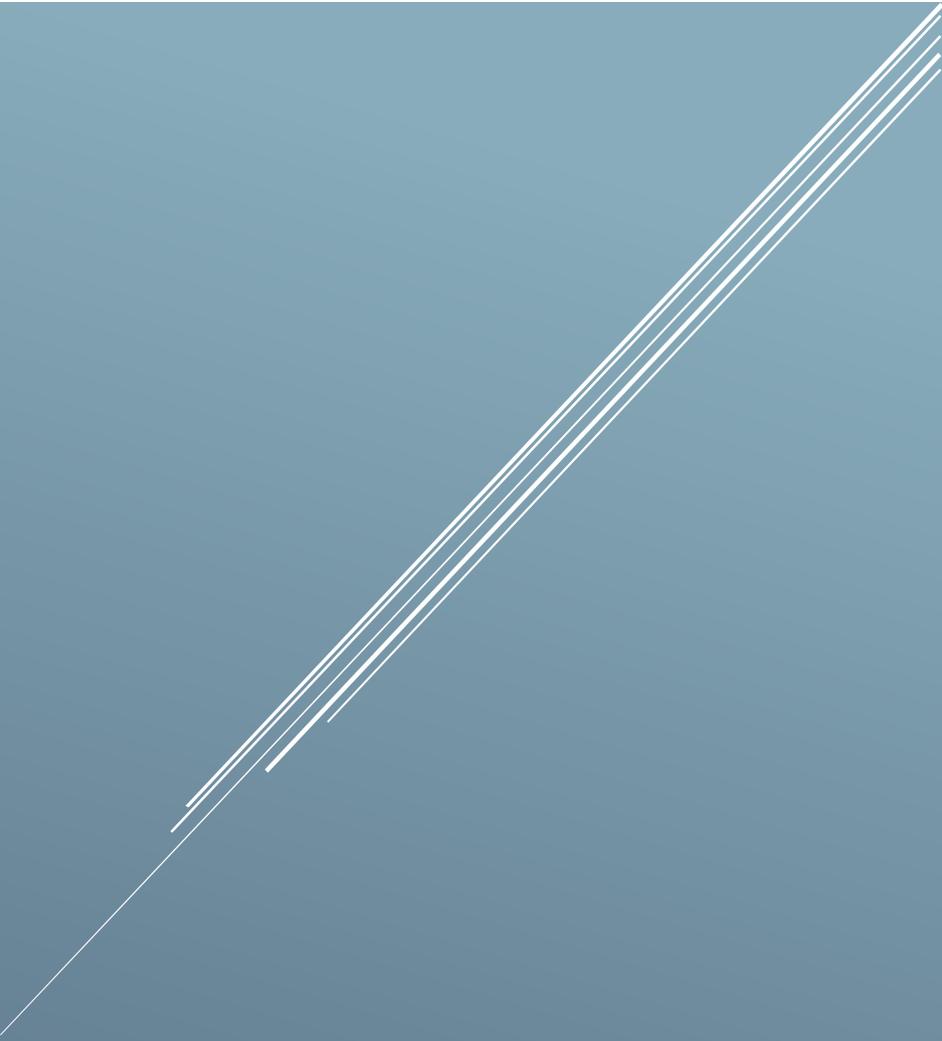
## Resumen

La interacción persona-computadora es hoy en día una acción imprescindible en la vida diaria de cualquier persona. En determinadas situaciones es un requisito contar con mecanismos alternativos de interacción, por fuera de los tradicionales, por ejemplo, con el fin de expandir tanto las capacidades de comunicación como del movimiento y traslado de personas con movilidad reducida.

El Procesamiento Digital de Imágenes brinda herramientas adecuadas para la detección y seguimiento del movimiento del globo ocular, específicamente, la segmentación del iris/pupila.

En este Proyecto, se desarrolló un método que permite a) la segmentación del iris con el fin de detectar la posición relativa del globo ocular a partir de secuencias de imágenes obtenidas con una cámara web, como único dispositivo de captura, sin requerir hardware adicional; y b) la identificación de movimientos relativos del ojo y gestos traducidos a movimiento y acciones de un cursor en una computadora. El método se implementó en una interfaz gráfica de usuario en MatLab®, incluyendo elementos de calibración y ajustes de los parámetros del método, permitiendo evaluar la interacción persona-computadora. Se partió de la determinación de una región de interés a partir del uso de un objeto de referencia adhesivo colocado en la frente del usuario. Con base en la posición detectada del objeto de referencia, se realizó el preprocesamiento y posterior detección y segmentación del iris por medio de la Transformada de Hough para circunferencias. Los resultados indican que los métodos desarrollados en el Proyecto resultan una solución robusta y adecuada, resultando mínimamente invasiva para el usuario.

Se presenta un análisis detallado de posibles mejoras de los métodos propuestos, incluyendo el uso de técnicas de Inteligencia Computacional, como son las Redes Neuronales Profundas, para la segmentación del iris lo que podría mejorar sustancialmente la robustez y sensibilidad de la detección y seguimiento de movimientos.



# INTRODUCCIÓN

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

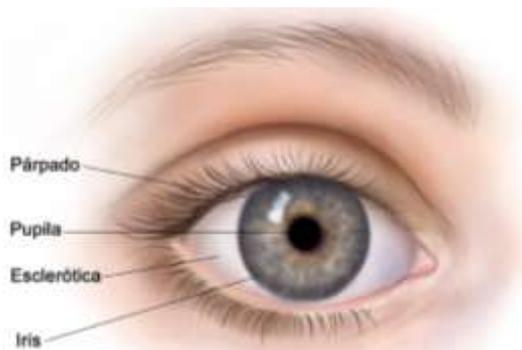
## Capítulo 1. Introducción

### Presentación del problema y estado de la cuestión.

En diferentes ámbitos de la ciencia, la industria, y hoy en día, en el desarrollo diario laboral y personal de cualquier individuo, la interacción con una computadora es de suma importancia y, en muchos casos, de vital trascendencia.

En determinadas situaciones es un requisito contar con mecanismos alternativos de interacción, por fuera de los tradicionales. El desarrollo de sistemas que permitan la interacción persona-computadora es siempre de alto impacto, principalmente desde el punto de vista de la ingeniería, ya que en general conlleva el desarrollo de sistemas que incluyen sensores, procesamiento y adecuación de señales, etapas de control, diseño ergonómico de los equipos de adquisición, entre muchas otras tareas. Tales sistemas pueden expandir las capacidades de interacción de aquellas personas con movilidad reducida, tanto desde el punto de vista de la comunicación como del movimiento y traslado.

El Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) puede ser un camino fructífero en el objetivo de conseguir esa intercomunicación mediante la detección y seguimiento del movimiento del globo ocular, específicamente, la segmentación<sup>1</sup> del iris/pupila y la detección de sus movimientos, mediante una computadora, sin requerir hardware adicional. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama con las principales partes del ojo humano, algunas de las cuales pueden utilizarse para la interacción persona-computadora.



**Figura 1.1** Partes externas del ojo humano.

Entre otros, pueden indicarse los siguientes ejemplos de la aplicación de PDI en segmentación/seguimiento de iris/pupila:

- Industria de transporte, monitoreando en forma continua al conductor, como es el

---

<sup>1</sup> Segmentación: se define como el proceso de dividir en partes o secciones constitutivas la imagen, con el propósito de extraer regiones, texturas y contornos presentes.

caso de la herramienta “*Guardian*”, de *Seeing Machines*, que funciona utilizando algoritmos de seguimiento de la cara y la mirada, midiendo la posición de la cabeza del conductor, velocidad de parpadeos, niveles de cierre de los ojos y movimientos de la pupila constantemente (*Seeing Machines*, <https://www.seeingmachines.com/guardian>);

- Medicina, para la realización de pruebas oculares con el fin de estudiar síndromes de atención, memoria y de toma de decisiones y también, en el diagnóstico de condiciones neurológicas y psiquiátricas (Botero, 2019);
- Biometría<sup>2</sup>, segmentando patrones de distintas partes del ojo, para su posterior aplicación en seguridad, control de personal u otros. En este sentido el reconocimiento del iris es uno de los métodos que presenta menores tasas de falla. El iris se caracteriza por ser una estructura física muy rica en datos, con independencia genética, estabilidad a lo largo del tiempo y protección física gracias a la córnea, que no inhibe la visibilidad externa (Murillo et al., 2014). Por otro lado, algunos avances recientes indican que la región esclerótica (la parte blanca del ojo que rodea al iris), al estar conformada por una estructura única y estable de vasos sanguíneos, puede también ser utilizada con fines de identificación biométrica (Zhou et al., 2012);
- Seguimiento de la mirada en una pantalla que puede ser utilizado en diversos ámbitos: comercial, publicitario, redes sociales, televisión, etc., permitiendo ver las cosas desde la perspectiva del consumidor, aportando información crucial para el diseño del empaque de un producto, la publicidad o la experiencia del usuario. El rastreo ocular revela conocimientos profundos sobre lo que capta la atención e impulsa la toma de decisiones en el proceso de compra, ayuda a evaluar el impacto de una marca y las opciones de diseño, comparándolas con la competencia, así como también permite revelar el rendimiento verdadero de un material publicitario (*Eye Tracking Para Marketing*);
- Interacción persona-computadora, brindando herramientas de comunicación a personas con movilidad reducida, con dificultades motrices en miembros superiores o pacientes con enfermedades neurológicas, como el ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica), que debilita los músculos y termina afectando las funciones físicas. En este campo existen en el mercado aplicaciones que cubren las cuestiones planteadas, pero requieren de hardware adicional y tienen un elevado costo. Ejemplo de ello son los sistemas: “*Hiru*” (Irisbond) e *Iriscom* que funcionan

---

<sup>2</sup> Biometría: aplicación de métodos estadísticos, mediciones y cálculos a procesos biológicos.

a partir de un dispositivo que entrega luz infrarroja con el fin de aumentar el contraste entre las diferentes partes del ojo y simplificar el proceso de segmentación (Palomo & Arrazola, 2010; HIRU <https://www.irisbond.com/tecnologia/hiru/>). En este último tipo de aplicación son relevantes tanto la segmentación del iris como de la pupila, ya que reflejan el movimiento del globo ocular, permitiendo la detección de la posición del ojo relativa a un determinado sistema de referencia, así como el cambio de posición en función del tiempo lo que, por ejemplo, puede convertirse en un cambio de posición de un cursor en una pantalla.

Independientemente del objetivo de atención buscado, es requerimiento de cualquier método de segmentación de iris y pupila la robustez frente al ruido y a las condiciones de adquisición (principalmente no uniformidad en la iluminación) así como la identificación del fenómeno de oclusión (párpados parcial o completamente cerrados) (Iskander et al., 2003; Jinyu Zuo et al., 2008). Típicamente, las primeras dos condiciones se corrigen con preprocesamiento de las imágenes adquiridas, incluyendo técnicas de filtrado y ecualización o especificación de histogramas (Comas et al., 2013; Woods, 2002). El fenómeno de oclusión, de poder detectarse, resulta de sumo interés en la interacción persona-computadora permitiendo la detección de otros gestos, adicionales a los de movimiento del globo ocular, los cuales enriquecerían esa comunicación con el dispositivo en uso.

La segmentación de las partes del ojo y, en especial, la detección de los movimientos del globo ocular, continúa siendo un problema abierto, con múltiples y potenciales aplicaciones.

## Objetivos

En este Proyecto se propone abordar la segmentación y seguimiento de movimiento del globo ocular y evaluar su aplicabilidad en el desarrollo de interfaces persona-computadora. Se partirá de imágenes de baja resolución, del tipo que pueden adquirirse a través de una cámara web conectada a una computadora, con el fin de estudiar el desarrollo de este tipo de interfaces sin uso de hardware específico.

Los objetivos son los siguientes:

- Desarrollar un método robusto de segmentación del iris y/o la pupila con el fin de detectar la posición relativa del globo ocular en secuencias de imágenes obtenidas con una cámara web;
- Implementar un algoritmo que permita identificar los movimientos relativos del ojo (gestos) para que puedan ser traducidos, por ejemplo, a movimientos de un cursor

en una computadora;

- Desarrollar y evaluar una interfaz que permita llevar a cabo la interacción persona-computadora e informar los parámetros utilizados en ese momento.

Adicionalmente, se plantea analizar las capacidades de utilización de la interfaz para el control de otros tipos de dispositivos, considerando, por ejemplo, el control de actuadores a partir de los movimientos y gestos detectados.

## Estructura del informe

En carácter de guía para el lector, se detalla la estructura del informe y el contenido de cada uno de sus capítulos.

En el Capítulo 2 se realiza una introducción a los conceptos de PDI vinculados con lo realizado en este proyecto, incluyendo métodos de detección de objetos, la Transformada de *Hough* para circunferencias y medidas de validación utilizadas en PDI.

En el Capítulo 3, Desarrollo e Implementación, se detallan las pruebas, ajustes e implementaciones de algoritmos y métodos basados en PDI para lograr el reconocimiento de iris/pupila y el seguimiento de sus movimientos. Además, se presenta la interfaz de usuario implementada para la interacción persona-computadora.

En el Capítulo 4, Resultados, se analiza cuantitativa y cualitativamente los resultados obtenidos de todo lo desarrollado en el Proyecto.

A continuación, en el Capítulo 5, se realiza un análisis de la continuación de lo abordado en este Proyecto, a partir de redes neuronales convolucionales.

Finalmente, las conclusiones se presentan en el Capítulo 6.

Se agregan al presente informe, como apéndices, los documentos producidos al inicio del Proyecto, a saber: los requerimientos y el cronograma inicial previsto.



# PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Capítulo 2. Procesamiento Digital de Imágenes

### Introducción

El PDI es el conjunto de técnicas y herramientas aplicadas sobre una imagen digital o digitalizada a través de un medio electrónico de cómputo que, en general, persigue tres objetivos fundamentales: a) mejorar la visualización general y/o destacar ciertos rasgos o características con fines interpretativos; b) almacenar, transmitir y representar la información contenida para un posterior análisis; c) describir y segmentar imágenes (Comas et al. 2014; Woods, 2002).

Una imagen puede representarse como una función  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  donde  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  representa las coordenadas espaciales y  $f(x, y)$  contiene la información de color en el punto  $(x, y)$ . Cuando tanto las coordenadas espaciales como la información de color son finitos y discretos, es decir toman sólo ciertos valores de un rango numérico, la podemos denominar una imagen digital. En este último caso, cada punto  $(x, y)$  indica un punto (píxel) en la imagen.

Dependiendo del tipo de información de color que tenga la imagen podemos distinguir (Comas et al. 2014; Woods, 2002):

- **Imágenes blanco y negro (binarias):** Cada píxel toma uno de dos valores posibles, 0 o 1. En general, el 0 se representa con negro y el 1, con blanco. En este caso, las imágenes estarán definidas por funciones de la forma:  $f: \mathbb{Z}^2 \rightarrow \{0,1\}$ .
- **Imágenes en niveles de gris:** Cada píxel toma un valor dentro de un rango de posibles valores que típicamente van desde 0 (negro) a 255 (blanco). En este caso, las imágenes estarán definidas por funciones de la forma:  $f: \mathbb{Z}^2 \rightarrow \{0,1,2,3, \dots, 255\}$ .
- **Imágenes color:** Cada píxel toma un valor que resulta de la combinación de diferentes propiedades o formas de representar el color (diferentes espacios de color). En general, las imágenes estarán definidas por funciones de la forma:  $f: \mathbb{Z}^2 \rightarrow \mathbb{R}^C$ , siendo  $C$  la cantidad de canales del espacio de color utilizado.

### Etapas y tipos de análisis del PDI

Una técnica de PDI puede definirse como cualquier forma de procesamiento de señales en la cual la entrada es una imagen y la salida puede ser una imagen, un conjunto de características o parámetros relacionados a la imagen inicial. El PDI se puede considerar desde dos enfoques: según el tipo de análisis del problema a llevarse a cabo (determinístico, heurístico o probabilístico), o según la etapa de procesamiento (preprocesamiento,

segmentación, representación e interpretación).

En detalle, el PDI, dependiendo de la clase de análisis del problema a ejecutarse puede ser del tipo (Comas et al. 2014; Woods, 2002):

- Determinístico: se examina el problema en forma cuantitativa mediante herramientas algebraicas y morfológicas;
- Heurístico: se analiza en base a modelos obtenidos de ensayos sobre imágenes con un posterior ajuste de adaptación y mejora;
- Probabilístico: mediante modelos estadísticos se trabaja para identificar características comunes para su posterior toma de decisiones.

Luego, según la etapa de procesamiento podemos determinar cuatro etapas esenciales (Comas et al. 2014; Gonzalez & Woods, 2002):

- Preprocesamiento: se prepara la imagen para la aplicación de algoritmos de procesamiento posteriores que permitirán la determinación e identificación de la información contenida. En el reconocimiento de iris/pupila se utiliza comúnmente la eliminación de reflejos especulares, filtros gaussianos para la eliminación de ruidos y ajustes de contraste y brillo mediante retoques de histograma, entre otros.
- Segmentación: se define como el proceso de subdivisión de la imagen en sus regiones u objetos constituyentes, de tal manera que los píxeles que pertenecen a esas regiones poseen propiedades o atributos similares. Hay que tener presente que, en los sistemas de reconocimiento de iris, la segmentación de iris/pupila es una de las etapas más importante para la puesta en funcionamiento;
- Representación: esta etapa está fuertemente ligada con la segmentación llevada a cabo y, permite identificar la información recogida en esta última. Algoritmos comunes de representación son: descriptores de Fourier, seguimiento de contorno y transformada de *Hough* (Gonzalez & Woods, 2002);
- Interpretación: en esta cuarta etapa se procede a analizar la información obtenida gracias a las etapas anteriores. Identificar coordenadas de posición y tamaño de radio de iris/pupila es un claro ejemplo para el caso de estudio abordado en este documento.

Dependiendo de la manera en que se ejecutan, los métodos de PDI están divididos en tres grandes grupos:

- Algoritmos en el dominio espacial: métodos que procesan una imagen píxel a píxel, o a partir de un grupo de píxeles vecinos.

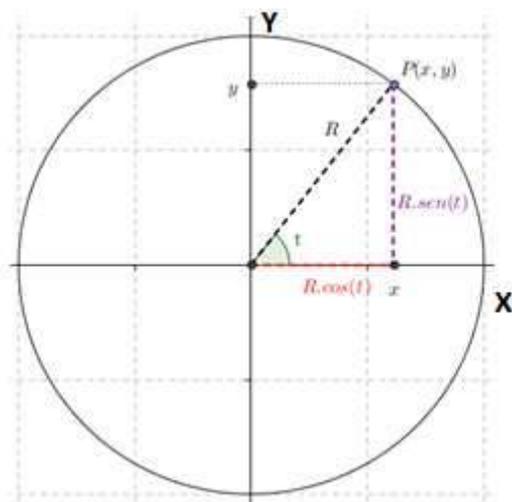
- Algoritmos en el dominio de la frecuencia: comúnmente, este tipo de métodos trabajan sobre los coeficientes resultantes de la Transformada de Fourier, o sino en técnicas basadas en medición de
- Algoritmos de extracción de características: están enfocados al análisis de imágenes para la extracción de atributos y regiones de interés, separación de objetos con el fondo, detección de formas o bordes, entre otros.

## Metodologías de PDI

En el resto de este capítulo, se introducirán los métodos de PDI utilizados durante el desarrollo del Proyecto, con el fin de poner en contexto al lector.

### Transformada de Hough

La transformada de *Hough* es un algoritmo utilizado para detectar figuras geométricas en una imagen mediante ecuaciones paramétricas. En la imagen se puede detectar cualquier forma correspondiente a alguna de las combinaciones de parámetros existentes en el espacio de estos, discretizado. Construido el espacio paramétrico, se establece qué combinaciones de parámetros tienen una mayor evidencia de pertenecer a una forma existente en la imagen de entrada. En este trabajo se buscan formas de circunferencia, que corresponden a las siguientes ecuaciones paramétricas:



$$P(x, y) = \begin{cases} x = C1 + R \cos(t) \\ y = C2 + R \text{sen}(t) \end{cases}$$

Donde:

(C1, C2): coordenadas del centro,

R = distancia al centro

**Figura 2.1** Gráfica de circunferencia con su ecuación y los parámetros correspondientes.

Cada punto de la imagen “vota” por todas las ecuaciones correspondientes a formas a las que pertenezca dicho punto. Los votos son almacenados en un arreglo acumulador, el cual contiene todas las combinaciones de los parámetros; el número máximo de votos en el arreglo acumulador corresponde a los parámetros de la circunferencia buscada. Por lo tanto,

las formas que obtengan un mayor número de votos serán aquellas que estarán presentes en la imagen (Viridiana et al., 2015).

### Características *Haar-Like*

*Haar-Like* es una característica simple rectangular que se usa como entrada para un clasificador en cascada. Se puede definir como la diferencia de la suma de píxeles de las áreas dentro del rectángulo, que pueden estar en cualquier posición y escala dentro de la imagen original. Este conjunto de características modificado se denomina característica de 2 rectángulos. Viola y Jones también definieron características de 3 rectángulos y características de 4 rectángulos. Los valores indican ciertas características de un área particular de la imagen. Cada tipo de característica puede indicar la existencia (o ausencia) de ciertas características en la imagen, como bordes o cambios en la textura. Por ejemplo, una característica de 2 rectángulos puede indicar dónde se encuentra el borde entre una región oscura y una región clara.

### Imagen Integral

Imagen integral es un método rápido para calcular la característica *Haar-Like*. La imagen integral es la suma de todos los valores de píxeles en la parte superior e izquierda de la posición  $(x, y)$ . El área negra de la figura 3 muestra la imagen integral. Con la imagen integral, la característica *Haar-Like* se puede calcular rápidamente mediante una simple suma y resta.

La localización  $(x, y)$  contiene la suma de los píxeles de la parte superior izquierda de la imagen y se puede calcular como se indica a continuación:

$$II(x, y) = \sum_{x' \leq x; y' \leq y} Im(x', y')$$

donde  $II(x, y)$  es la imagen integral e  $Im(x', y')$  es la imagen original.

### Algoritmo *AdaBoost*

El algoritmo *AdaBoost* (un meta-algoritmo de *machine learning*) es un método de clasificación que combina varios clasificadores básicos para formar un único clasificador más complejo y preciso, lo que se denomina un ensamble de clasificadores. La idea se basa en la afirmación de que varios clasificadores sencillos, cada uno de ellos con una precisión ligeramente superior a una clasificación aleatoria, pueden combinarse para formar un clasificador de mayor precisión, siempre y cuando se disponga de un número suficiente de muestras de entrenamiento.

El algoritmo Viola-Jones utiliza el *AdaBoost* en la forma en que ensambla una serie de clasificadores como una cadena de filtros. Cada filtro es un clasificador *AdaBoost* separado que consta de unos pocos clasificadores débiles. Si cada uno de estos filtros en la región de aceptación de la imagen muestra que falla, esta área se clasifica inmediatamente como objeto no detectado. Cuando un filtro acepta un área de imagen como la buscada, el área ingresa al siguiente filtro en la cadena. Si esta área de la imagen pasa con éxito todos los filtros de cadena, se clasifica como objeto detectado.

En este algoritmo, cada ciclo de potenciar una característica entre todas las demás características potenciales se selecciona y, al final, la clasificación final será una combinación lineal de la clasificación inicial débil.

### Clasificador en cascada

En vez de construir un único clasificador mediante el proceso *Adaboost*, se pueden construir clasificadores más pequeños y eficientes que rechacen muchas ventanas negativas (es decir, aquellas que no incluyan ninguna instancia del objeto buscado) manteniendo casi todas las positivas (es decir, las que contienen una instancia del objeto buscado). Estos clasificadores más simples se utilizan para rechazar la mayoría de las ventanas de búsqueda y solo en aquellas en las que hay mayores probabilidades de encontrar el objeto indagado se llama a clasificadores más complejos que disminuya la cantidad de falsos positivos.



Figura 2.2 Clasificador en cascada.

Se obtiene así, entonces, una cascada de clasificadores, cada uno de los cuales es entrenado con *AdaBoost* y después sus valores umbrales se ajustan para minimizar los falsos negativos. La cascada entrenada por Viola-Jones tiene 38 etapas y más de 6000 características, pero de media se evalúan únicamente 10 características por ventana de búsqueda (Gonzalez et al., 2019; Jensen et al., 2008).

### Algoritmo de Viola Jones

El algoritmo de Viola-Jones es un utilizado frecuentemente en la detección de objetos desde hace tiempo. Tiene un coste computacional bajo que permite que sea empleado en tiempo real, fue propuesto por Paul Viola, de *Mitsubishi Electric Research Labs*, y Michael Jones, de *Compaq CRL*, en julio de 2001. Su desarrollo fue motivado por el problema de la detección de caras, donde sigue siendo ampliamente utilizado, pero puede aplicarse a otras

clases de objetos que estén también caracterizados por patrones típicos de iluminación.

El algoritmo se basa en la comparación entre las intensidades luminosas de regiones rectangulares de las imágenes denominadas Características *Haar-Like* que se calculan empleando una imagen integral. Estos clasificadores se agrupan en cascada empleando el algoritmo de aprendizaje basado en el anteriormente descrito *AdaBoost* para conseguir un alto rendimiento en la detección, así como una alta capacidad discriminativa en las primeras etapas.

## Evaluación de calidad en la segmentación de imágenes

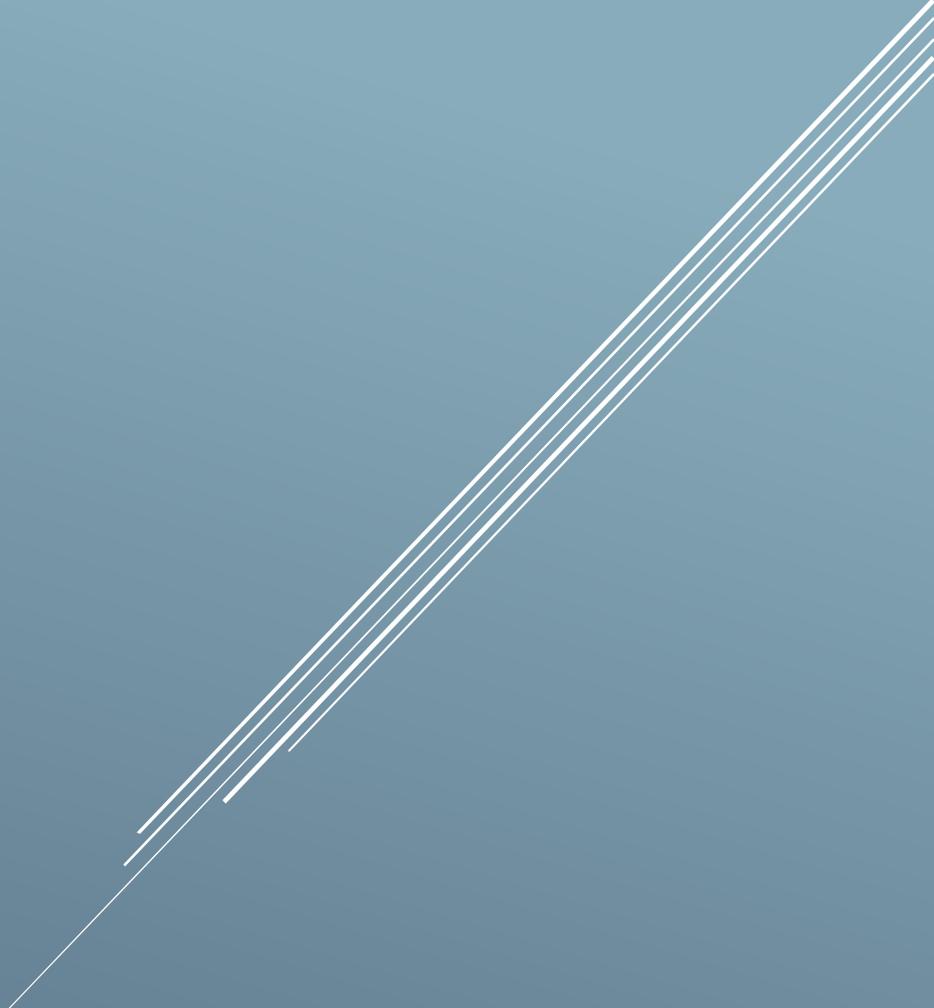
Para determinar la bondad del algoritmo utilizado en el reconocimiento de formas es necesario realizar una evaluación global de la etapa de segmentación de imágenes. Para dicha valoración se hace uso de coeficientes que estiman la performance del método utilizado.

En general para poder medir cuantitativamente la calidad de la segmentación debe contarse con imágenes previamente segmentadas y así poder ser tomadas como referencia (llamadas *Gold-Standard*). En el caso del uso de métodos donde las imágenes *Gold Standard* no están disponibles, pueden utilizarse métodos de validación que utilicen información presente en el conjunto de datos sin la necesidad de utilizar datos de segmentaciones previas.

En este proyecto se utilizó el coeficiente de Tanimoto (*TC*, del inglés *Tanimoto Coefficient*). Sean *A* y *B* conjuntos de elementos que representan respectivamente el conjunto esperado (*Gold-Standard*) y el obtenido. El *TC* se define formalmente como sigue (Comas et al. 2014):

$$TC = \frac{\#(A \cap B)}{\#(A) + \#(B) - \#(A \cap B)}$$

donde *#* indica la cantidad de elementos (el cardinal) del conjunto. El coeficiente de Tanimoto es el cociente entre el número de elementos iguales, medido mediante la intersección de ambos, y el número de elementos distintos. Si  $TC = 1$ , la similitud entre los conjuntos es total, en cambio, si  $TC = 0$ , los conjuntos no comparten ningún elemento. Este coeficiente también toma el nombre de *IOU* (*intersection over union*) en artículos y literatura actual.



# DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Capítulo 3. Desarrollo e implementación

### Introducción

Conforme a los objetivos definidos para el proyecto, se realizó una extensa búsqueda bibliográfica y estudio de material considerando diferentes métodos y sistemas existentes no sólo para la segmentación del iris/pupila sino también el seguimiento del movimiento del globo ocular. Se profundizó en el estado del arte, específicamente en trabajos que abarcaran el uso de imágenes adquiridas con cámaras web. Varios de estos métodos se probaron y analizaron preliminarmente para luego centrarse en pruebas y ajustes a partir de la propuesta de una metodología, considerando las características de las imágenes a utilizar (fundamentalmente la baja resolución de las imágenes adquiridas con cámaras web de bajo costo y las condiciones de brillo y contraste). Como conclusiones de esta etapa se determinó la necesidad de realizar la segmentación del iris/pupila, conocer su radio y centro (considerando que se trata de formas circulares) y utilizar dicho centro como forma de detectar los movimientos del globo ocular, definiendo un sistema de referencia adecuado.

Posteriormente, se procedió a la construcción de un algoritmo para el seguimiento de los movimientos del globo ocular para una posterior interacción persona-computadora, incluyendo la identificación de los cambios relativos de posición del ojo para ser traducidos, por ejemplo, en movimientos de cursor en una computadora. Para todo esto último se diseñó una interfaz gráfica para ajustar parámetros de detección y seguimiento adaptados al usuario y al ambiente en el momento de utilizarlo. Con el uso de dicha interfaz se pudo evaluar la factibilidad de la detección de los movimientos del globo ocular a partir de imágenes adquiridas con cámaras web y, a partir de esto, evaluar el grado de interacción posible pensando en un sistema que permita la interacción persona-computadora.

El trabajo del Proyecto incluyó la lectura y comprensión de material bibliográfico, el diseño de posibles algoritmos, su validación, ajuste y el desarrollo de las versiones finales tanto de los métodos como de las interfaces gráficas de usuario para la prueba de la interacción persona-computadora. El total de los programas fue desarrollado de MATLAB®, por tratarse de una plataforma adecuada para el prototipado de algoritmos de PDI y contar con herramientas para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario. Esto no anula la posibilidad de reescribir lo prototipado en lenguajes para producción, como Python, actualmente utilizado en gran cantidad de aplicaciones.

En las secciones que siguen se detallan los pasos y análisis realizados en las distintas etapas que componen este Proyecto, dividiendo su desarrollo en tres etapas: i) Segmentación del iris y pupila; ii) Identificación de movimientos; y iii) Interfaz para interacción persona-computadora.

## Segmentación del iris y pupila

Los métodos existentes, de los cuales se partió, se basan esencialmente en la segmentación del iris/pupila considerando que son formas circulares sobre una zona clara (la membrana esclerótica). La dificultad particular del uso de imágenes provenientes de cámaras web puede dividirse en dos partes:

- a) Tamaño de la escena, donde los ojos sólo ocupan una pequeña porción de ella y considerando la resolución relativamente baja de este tipo de imágenes, los ojos quedan representados por poca cantidad de píxeles.
- b) Elementos como la boca, cejas y, también, el fondo detrás de la persona, interfieren en el método de segmentación, por lo que se requiere su análisis y/o eliminación durante el proceso.

En tal sentido y a partir de lo estudiado en los trabajos relevados, se definió como primer objetivo de segmentación la definición de una zona de interés. Para este objetivo, se utilizó el algoritmo de Viola-Jones, dividiendo así cada imagen en región de interés y fondo. Dicha zona de interés inicialmente podía ser: la cara, ambos ojos juntos, ojo izquierdo u ojo derecho, probando diferentes parámetros del algoritmo para cada caso. En la Figura 3.1 se muestran ejemplo de dicha segmentación. En dichas imágenes, el interior del rectángulo amarillo contiene la zona de interés.



**Figura 3.1** Pruebas de segmentación de zona de interés. Se probó la posibilidad de segmentar la cara, ambos ojos y, también, ojo izquierdo u ojo derecho.

Con la zona de interés segmentada, se probaron técnicas de segmentación por medio de umbralamiento en niveles de gris y también se realizaron ensayos en imágenes en formato color RGB y HSV (Gonzalez & Woods, 2002; Moravčík et al., 2011). Todas estas pruebas se combinaron con técnicas de preprocesamiento a fin de obtener una óptima segmentación de iris/pupila. Algunos resultados de las pruebas realizadas combinando técnicas de

preprocesamiento y umbralamiento se muestra en la Figura 3.2. Como se observa en estos resultados, el umbralamiento detecta parte del iris/pupila, pero en general la segmentación incluye parte de la membrana esclerótica y/o el borde de las cejas y las pestañas, en muchos de los casos unidos, es decir, como una única región conectada.

Si bien, a partir de los resultados del umbralamiento, es posible filtrar los elementos no deseados, por ejemplo, con Morfología Matemática Binaria (Gonzalez & Woods, 2002) realizando un filtrado por área (Comas et al., 2013), los resultados obtenidos indicaron que no es el camino más adecuado para la segmentación del iris/pupila y su posterior seguimiento. Asimismo, la determinación del valor adecuado de umbral no es trivial, dependiendo fuertemente de las condiciones de brillo y contraste de las imágenes adquiridas, por lo que no pudo llegarse a un método robusto de segmentación como el requerido. Los métodos existentes para la determinación automática del valor de umbral como por ejemplo el umbral de Otsu (Otsu, 1979), demostraron no ser adecuados. En tal sentido, el umbralamiento, como técnica de segmentación del iris/pupila fue descartado.



**Figura 3.2** Resultados de ensayos iniciales de segmentación por medio de umbralamiento en niveles de gris a partir de la segmentación de la zona de interés. En muchos de los casos se observa la detección de una región conectada que incluye parte del iris/pupila y otras partes no deseadas.

Posteriormente, en una segunda etapa, se ensayaron pruebas de segmentación de iris/pupila combinando técnicas de preprocesamiento con la Transformada de *Hough* para circunferencias en niveles de gris (Cortez et al., 2013). Se incluyeron, entre otros, los siguientes enfoques:

- La conversión directa de las imágenes a niveles de gris, su preprocesamiento y ajuste de contraste (incluyendo especificación de histogramas (Comas et al., 2013) y, posteriormente, Transformada de *Hough* para circunferencias en niveles de gris;

- Trabajo con componentes de las imágenes en R, G y B, a través de procesamiento marginal, incluyendo preprocesamiento y posteriormente Transformada de *Hough*;
- Variantes utilizando distintos espacios de color (incluyendo HSI y HSV) y trabajando en las componentes de iluminación para ajustar el brillo y contraste y, posteriormente, su conversión a niveles de gris para aplicar la Transformada de *Hough* para circunferencias en niveles de gris.

Considerando los resultados de las diferentes pruebas, se arribó a la propuesta de un método general con las siguientes etapas:

- a) Extracción del área de interés por medio del algoritmo de Viola-Jones;
- b) Preprocesamiento de la imagen conteniendo el área de interés con el fin de ajustar el brillo y el contraste;
- c) Aplicación de la Transformada de *Hough* para circunferencias en niveles de gris sobre la imagen del paso anterior. Se adoptó la implementación de dicha transformada incluida en el software MATLAB®.

La validación de esta propuesta se realizó primero sobre imágenes de ojos extraídas de una base de datos pública disponible en la web, para luego pasar a ajustar el método en función de las características propias del tipo de imágenes adoptado en el Proyecto.

Como se explicó en el Capítulo 2, la Transformada de *Hough* es un mapeo del espacio cartesiano a un espacio de parámetros, donde cada curva parametrizable queda representado por sus parámetros; en el caso estudiado aquí cada circunferencia queda representado por las coordenadas de centro y su radio. La detección correcta de las circunferencias presentes que corresponden a iris/pupila requirió un ajuste de los radios de búsqueda. En tal sentido, el radio del iris/pupila depende esencialmente de la resolución de la cámara web y de la distancia del usuario a la cámara. Esto último podría variar durante el uso. Estas consideraciones son analizadas en la siguiente sección.

### **Ajustes al método de segmentación**

En el transcurso del desarrollo del trabajo se debieron realizar varios ajustes para obtener mejoras en los resultados. Una vez definido un método base para la segmentación, se incorporaron opciones de configuración/ajuste. Asimismo, se trabajó con imágenes extraídas de videos capturados por una cámara web de 720p (HD), utilizando programas específicos de captura y control del dispositivo incorporados a las librerías de MATLAB®.

Para el caso en el que se encuentran varias cámaras conectadas a la computadora, se agregó una ventana emergente al activar la cámara para poder elegir entre las opciones de una lista, como se ve en la Figura 3.3.



**Figura 3.3** Ventana para selección de cámara web.

Con la intención de evitar falsos positivos en la detección del iris debido a cambios de iluminación, se adicionó un control de brillo. Este ajuste varía el brillo de la imagen por medio de una barra deslizante y permite buscar el punto de iluminación óptimo para los casos en que el proceso de reconocimiento de iris lo necesite.



**Figura 3.4** Control de brillo mediante ajuste manual de barra deslizante.

El mayor inconveniente que se encontró al definir el método de segmentación y al diseñar el método para el seguimiento de los movimientos fueron las variaciones de la ubicación relativa de la cara del usuario en la imagen (debido a movimientos) y el ya mencionado cambio en la distancia entre el usuario y la cámara, que repercute en el radio de las circunferencias a detectar, produciendo falsas detecciones. En tal sentido, se evidenció la necesidad fijar un punto que se use para determinar el sistema de referencia que copie los movimientos del usuario (su cabeza) y que también permita determinar la necesidad o no de corregir el rango de radios buscados en la detección del iris/pupila.

Se procedió a la inclusión de un elemento físico “testigo”, fijo, el cual permite la independencia de movimientos de la cabeza y ayuda en la segmentación inicial. Con este ajuste, el recuadro de la zona de interés se consigue a partir de la posición del elemento fijo y un recuadro de una medida fija, establecida empíricamente, como se muestra en la Figura 3.5. Luego de pruebas de segmentación, se determinó que el punto fijo tomado de referencia sería un cuadrado de color único, con la posibilidad de seleccionar entre tres diferentes colores posibles: rojo, azul o verde, con la idea de darle robustez al sistema para evitar falsos positivos con los colores del entorno presentes en cada uso. Su ubicación horizontal es mediando la ubicación de los ojos, mientras que la vertical no debe alejarse mucho de la línea de estos. De todos modos, durante la calibración del sistema (que se detalla en la próxima sección) se puede ajustar la posición óptima, de ser necesario.

La segmentación del objeto de referencia, la determinación de su posición y área se realizó de la siguiente manera:

- a) Se trabaja con la componente R, G o B según sea el color del recuadro (rojo, verde o azul), el cual es un parámetro indicado por el usuario;
- b) Se resta a la componente la imagen original convertida a escala de gris, resultando en una imagen con altos valores en la zona correspondiente al objeto de referencia.
- c) Se procede al umbralamiento y posterior filtrado morfológico con el fin de realizar la segmentación del objeto de referencia.
- d) Se calcula su área y centro de masa. La raíz cuadrada del valor de área permitirá ajustar el rango de los radios durante la detección del iris/pupila (si se detecta variación entre *frame* y *frame*) y el centro de masa permite definir el sistema de referencia para una posterior detección de movimiento.



**Figura 3.5** Ejemplo de utilización del elemento usado de referencia. En este caso, en color rojo.

La identificación del objeto de referencia permite fijar un sistema de referencia que se ajusta y calibra de acuerdo con los movimientos del usuario. Asimismo, con un adecuado ajuste en función de las características morfológicas de cada usuario, permite definir directamente (sin ningún tipo de procesamiento) la región de interés donde se ubican los ojos. Durante el desarrollo del proyecto, se definió usar el algoritmo de Viola-Jones durante la calibración, ajustando las coordenadas del recuadro directamente según los cambios de área y centro de masa del objeto de referencia. Una vez hecho esto, fue posible aplicar el método de definido para la segmentación y detección del iris/pupila. Asimismo, el uso del objeto de referencia permitió definir un ajuste adicional, permitiendo al usuario indicar qué ojo (derecho o izquierdo) usar para la detección y la identificación de movimientos.

## Identificación de movimientos

Una vez resuelta la detección del iris/pupila y establecido un mecanismo adecuado

para fijar el sistema de referencia, se abordó la identificación y el seguimiento de los movimientos del globo ocular. En tal sentido, cabe aclarar que dichos movimientos se asumen aquí igual a los movimientos del iris.

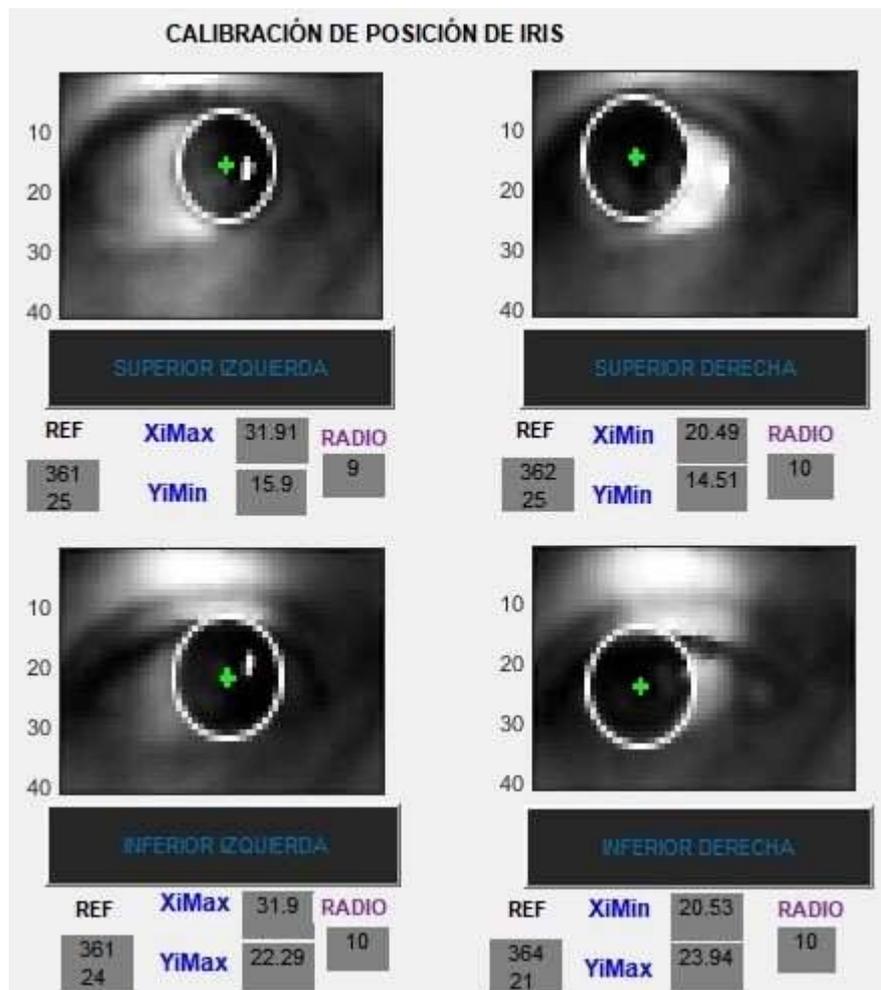
Para poder identificar los movimientos, deben detectarse cambios en la posición detectada para el iris considerando imágenes tomadas en dos instantes de tiempo diferente. Asimismo, considerando el sistema de referencia fijado por el objeto de referencia, se deben identificar los movimientos máximos del globo ocular, que dependen de la fisonomía de cada usuario. Observando estos requerimientos de diseño, se implementó una interfaz de calibración (Figura 3.6). Luego de varias pruebas, se determinó la calibración de la siguiente manera:

- a) Se toman cuatro imágenes (una para cada extremo del espacio de trabajo del cursor con los movimientos del ojo), haciendo el que usuario fije la mire hacia las posiciones: superior izquierda, superior derecha, inferior izquierda e inferior derecha.
- b) Para cada una de estas imágenes se realiza la detección de la posición del iris, utilizando el método de segmentación definido en la etapa anterior.
- c) Las cuatro posiciones definen los máximos movimientos y, por lo tanto, las posiciones extremas del globo ocular del usuario. Todas las posiciones y medidas deben re-escalarse durante el uso, ajustando de acuerdo con los cambios detectados en la segmentación del objeto de referencia.

Una vez realizada la calibración se comienza a identificar movimientos y realizar el seguimiento de ellos. Adoptando como estándar de uso imágenes en 720p (HD) tomadas a 30 cuadros por segundo, se estableció como necesario que todo el proceso permita el uso en tiempo real. Tal proceso conlleva los siguientes pasos:

- a) Segmentación del objeto de referencia, cálculo de área y centro de masa;
- b) Extracción de área de interés (área de búsqueda) ajustada al ojo derecho u ojo izquierdo de acuerdo con el requerimiento del usuario;
- c) Preprocesamiento del área de interés y detección del iris (definición de coordenadas de centro y radio);
- d) Traslación de coordenadas de centro al sistema de referencia definido por el objeto de referencia;
- e) Análisis de cambio en la posición del centro del iris y determinación del movimiento del ojo ocular (dirección y cambio relativo a los movimientos máximos establecidos durante la calibración).

Los ajustes realizados durante el desarrollo del Proyecto permitieron realizar los 5 pasos anteriores en el tiempo transcurrido entre *frames*, es decir, en menos de 1/30 s, permitiendo su aplicación en tiempo real.



**Figura 3.6** Imagen de calibración. Cuatro tomas de segmentación del iris que permiten la calibración del sistema.

## Interfaz para interacción persona-computadora

La interacción persona-computadora requirió definir un criterio para trasladar los movimientos del globo ocular detectados en la etapa anterior a acciones concretas en la computadora. En tal sentido, en una primera etapa se exploró la posibilidad utilizar los movimientos detectados para mover el cursor de la computadora (conocido habitualmente como puntero del *mouse*). Se exploraron dos enfoques:

- i. El mapeo directo de la posición del iris a la posición del cursor en la pantalla, considerando para esto los movimientos máximos detectados durante la calibración;
- ii. El movimiento relativo del cursor, considerando la dirección del vector

desplazamiento definido como la resta vectorial de la posición en el cuadro presente ( $t$ ) y el cuadro inmediatamente anterior ( $t - 1$ ).

En una primera instancia, el enfoque i) presentó una alta sensibilidad y no se mostró óptimo para cumplir con el objetivo. Por otro lado, el enfoque ii), se mostró más efectivo que el primero. Para adaptarse a las condiciones de uso en cada caso, se consideró la posibilidad de ajustar el movimiento del cursor variando la velocidad en diferentes escalas: baja, media y alta, y tipo de movimiento (para permitir elegir entre el enfoque i) y ii): relativo o absoluto a las distancias de un objetivo a otro.

En busca de evaluar la posibilidad de la interacción persona-computadora con el enfoque propuesto, se diseñó una interfaz con el fin de realizar la calibración y ajuste de los parámetros de los métodos desarrollados (incluyendo color de objeto de referencia, ajuste de brillo, calibración de movimiento, y parámetros para el seguimiento de movimientos del globo ocular). Con dicho fin se diseñaron dos ventanas, la primera correspondiente a la calibración y parametrización del sistema, y la segunda, que se muestra inmediatamente después de realizada la calibración, correspondiente a la etapa de identificación y seguimiento de movimientos del globo ocular, permitiendo visualizar los resultados obtenidos de los métodos que implementan los pasos a) a e) detallados en la sección anterior para la identificación de movimientos.

La ventana de calibración (Figura 3.7) está compuesta de:

- Botón de inicio de vídeo: conecta a la cámara web, consultando a cuál de las disponibles desea hacerlo.
- Recuadro de video actual.
- Recuadro de cada una de las imágenes obtenidas de las cuatro posiciones necesarias para la calibración propiamente dicha, acompañada por los recuadros de coordenadas de posición y radio de iris medida. También aparece indicada las coordenadas de posición del objeto de referencia, definido como origen del sistema de referencia.
- Botón “FINALIZAR CALIBRACIÓN”: Cierra la ventana de calibración y pasa a la de seguimiento.



Figura 3.7 Ventana de Calibración de posición de iris.

Contiene ajustes de las variables de:

- Iluminación: Permite adecuar en forma manual a través de una barra deslizante entre valores máximos y mínimos de brillo.
- Ojo a detectar: derecho/izquierdo.
- Color del objeto de referencia: rojo, verde o azul.
- Parámetros de velocidad de seguimiento: baja, media o alta. Influye en la forma que responde a la detección de movimientos del iris, por ejemplo: la velocidad de respuesta del cursor del *mouse* en el escritorio.
- Parámetros de tipo de seguimiento: relativo/absoluto a los cambios de posición del iris.

La ventana de seguimiento (Figura 3.8), llamada *Iriscursor*, está enfocada en la muestra de los parámetros fijados en la etapa anterior, coordenadas de calibración, además de las coordenadas de posición y radio actuales del iris segmentado en cada toma de imagen, y su correspondiente posición final calculada del cursor en pantalla. Esta ventana resultó de sumo interés a los propósitos del estudio planteado en este Proyecto, ya que permite ver en tiempo real resultado de las distintas etapas de los métodos estudiado y propuesto y evaluar el efecto de cambios en los parámetros de calibración. Además de la información presentada en esta ventana, se implementó y evaluó la modificación en tiempo real de la posición del puntero del *mouse* y se evaluó la posibilidad de detectar otros gestos que el usuario pueda hacer con los ojos a fin de trasladarlos a acciones concretas sobre la computadora. El detalle de los resultados de todas estas pruebas y variaciones de la implementación se presenta en

detalle en el Capítulo 4.

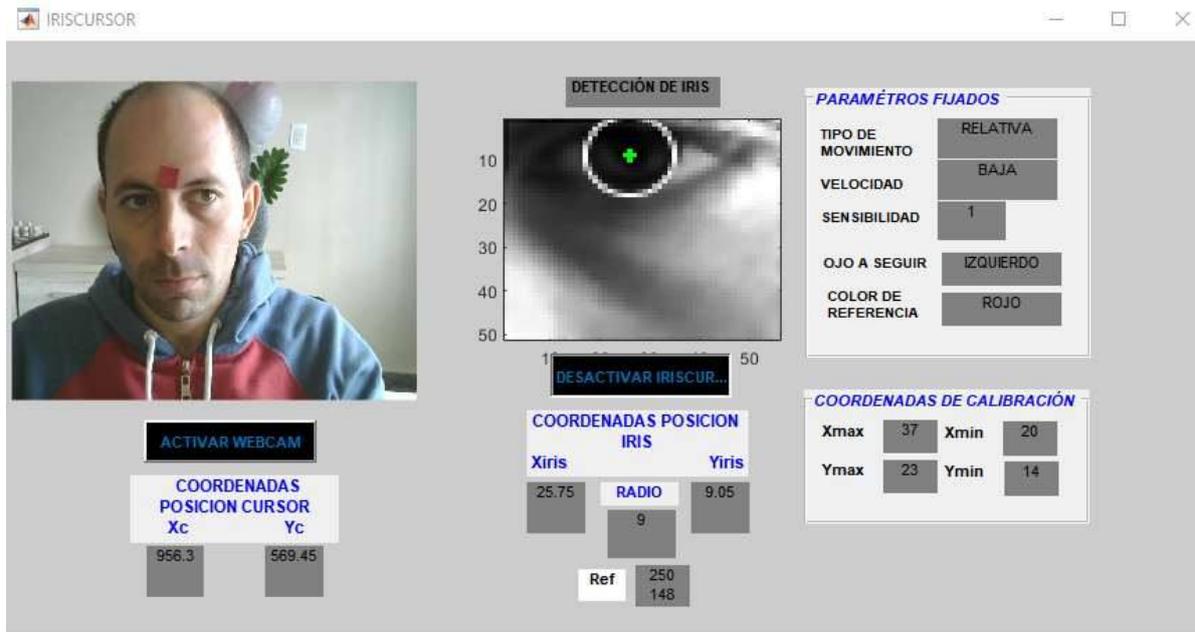
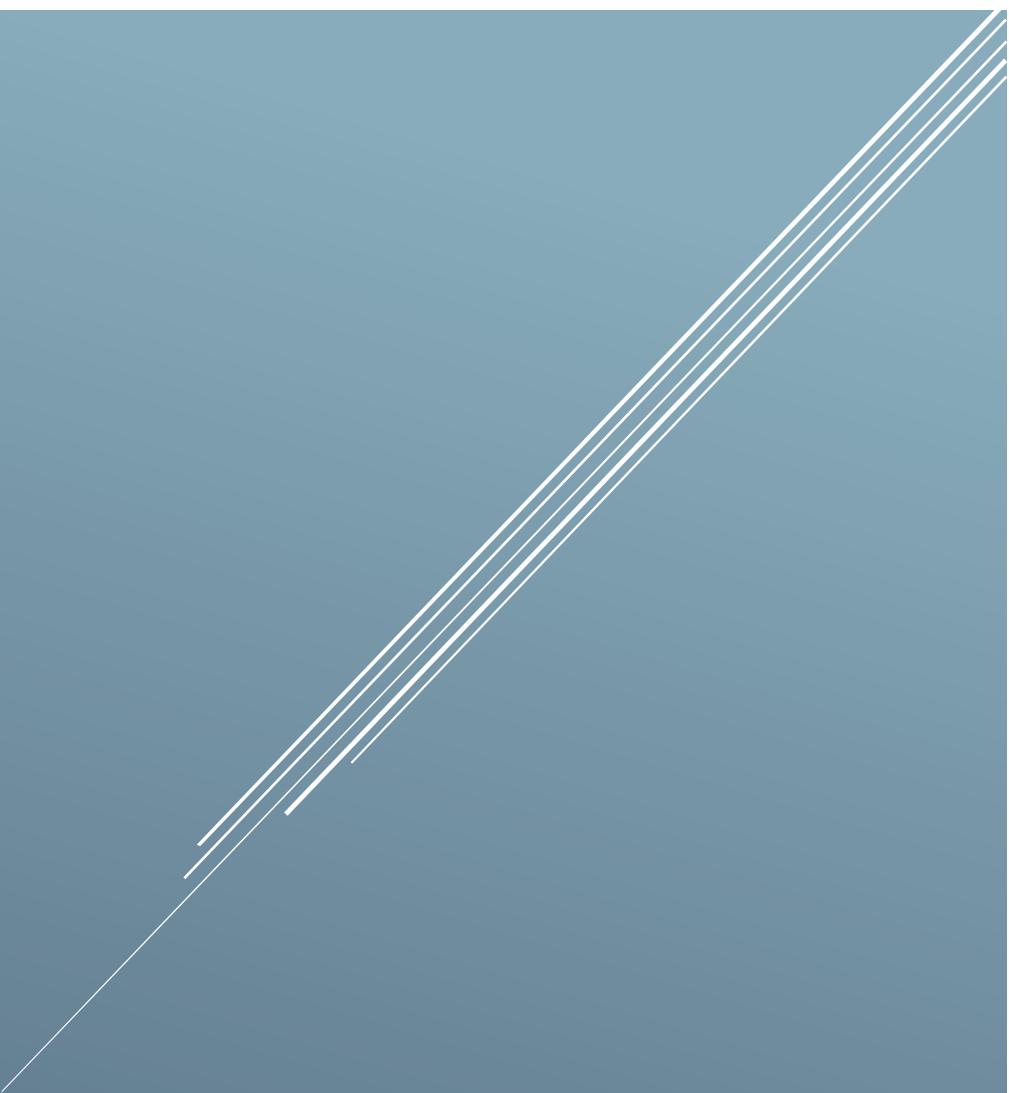


Figura 3.8 Ventana de seguimiento relativo *Iriscursor*.



# RESULTADOS

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

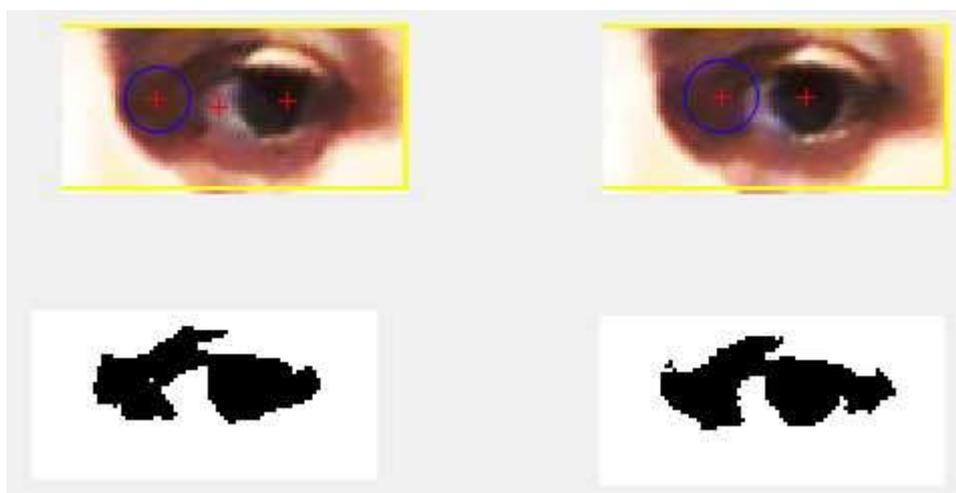
## Capítulo 4. Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados de la evaluación cuantitativa y cualitativa de las diferentes etapas del Proyecto, correspondiendo a la segmentación de la zona de interés, la segmentación del ojo, la identificación de los movimientos del globo ocular y las utilidades de la interfaz gráfica propuesta para la evaluación de los métodos y para la interacción persona-computadora. Las características más relevantes que fueron evaluadas se encuentran:

- Error de segmentación de cada uno de los objetivos (objeto de referencia, región de interés e iris/pupila);
- Error en la determinación de la posición (centro) del iris/pupila;
- Robustez a cambios de iluminación ambiente;
- Robustez a diversidad de colores de iris, colores de piel y fisonomía;
- Tiempo de procesamiento (requiriendo aplicación en tiempo real considerando imágenes tomadas a 30 fps).

### Segmentación del iris y pupila e identificación de movimientos

Como se detalló en el capítulo anterior, se realizaron pruebas de segmentación mediante umbralamiento, las cuales no alcanzaron buenos resultados, presentando alta sensibilidad al valor de umbral utilizado y a los niveles iluminación ambiente.



**Figura 4.1** Pruebas de detección de iris usando segmentación por umbralamiento analizadas en el inicio del Proyecto. Centros se indican con cruces en rojo. La circunferencia en azul indica la detección del iris.

En la Figura 4.1 se muestran a modo de ejemplo resultados de la segmentación (imágenes binarias) y detección de centros con Transformada de *Hough* (los centros se indican con cruces en rojo, la circunferencia azul indica la ubicación detectada para el iris

considerando los radios definidos).

Con el avance mejoras en el método de segmentación, se realizó una evaluación cuantitativa del error en la segmentación y en la posición detectada para el iris/pupila. A fin de llevar a cabo esta evaluación, se utilizaron 300 imágenes de la base de datos UBIRIS.v2 (Proença et al., 2010) disponible en el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (LPI) del ICyTE, y un conjunto de imágenes con 20 tomas obtenidas mediante la cámara web construida en el marco del Proyecto, completando un conjunto de imágenes con diferentes iluminaciones, diversidad de colores de iris, de fisonomía, posición relativa del ojo y colores de fondo. Para el total de las imágenes, se realizó la demarcación manual del borde (circunferencia) del iris, generando imágenes *gold-standard* (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Definición del *gold-standard* manual para poder realizar la evaluación cuantitativa.

Utilizando las imágenes descritas, en primer lugar, se procedió a la segmentación para la detección de la posición del iris y su radio, registrando estos datos y analizando visualmente los resultados como se muestra en la Figura 4.3 (centros detectados se muestran en verdad, circunferencias correspondientes a la segmentación se muestran en azul). Visualmente, los resultados se mostraron prometedores, observando una buena correspondencia entre lo detectado y lo esperado (Ver Figura 4.4).



**Figura 4.3** Resultados de las pruebas de segmentación en diferentes condiciones de iluminación, color de ojos y posición ocular. Los centros se indican en verde y la circunferencia asignada al iris en azul.

Para finalizar la evaluación de esta etapa se procedió a la realización de diferentes cálculos de comparación entre lo obtenido con el sistema y el *gold-standard*. Se hallaron las diferencias de distancias entre ambos centros y cada una de sus coordenadas de posición, las diferencias entre ambos radios, los errores relativos y el coeficiente de Tanimoto entre la segmentación considerando el interior de las circunferencias detectadas y objetivo (*gold-*

*standard*). En la Tabla 4.1 se presentan los valores promedio. Analizando los valores de error obtenidos, se observa un error bajo en la determinación del centro, principalmente considerando los errores de las imágenes tomadas con la cámara web. El coeficiente de Tanimoto indica un buen resultado de segmentación también para el mismo caso.



**Figura 4.4** Muestras de ensayos realizados de detección de iris y sus respectivas referencias (*gold-standard*).

**Tabla 4.1** Valores **promedio** de error en la detección de iris con el método final propuesto. La primera fila corresponde a imágenes de tomas manuales y la segunda a imágenes de la base de datos UBIRIS.v2.

Diferencias absolutas (en píxeles)				Error Relativo			TC
Radios	Centro X	Centro Y	Distancia centros	Radio	Centro X	Centro Y	
0,96	1,29	1,59	2,27	10,68	4,80	6,36	0,67
1,68	4,82	1,70	5,38	18,66	16,47	7,56	0,55

Para la evaluación de la identificación y el seguimiento de movimientos del globo ocular se evaluó el seguimiento de la posición de iris y el consiguiente posicionamiento del cursor en pantalla. En principio, se realizaron pruebas estáticas tomando un punto fijo en pantalla como referencia para una evaluación cuantitativa; luego se llevaron a cabo ensayos dinámicos llevando el cursor por diferentes zonas de la pantalla con el fin de evaluar el comportamiento del sistema en forma integral. A pesar de haber encontrado resultados mejorables a nivel cuantitativo, al evaluar toda la metodología en su totalidad (incluyendo el algoritmo de seguimiento) se observan buenos resultados de funcionamiento, con fluidez de respuesta ante los cambios de posición del globo ocular y el consecuente cambio de posición del cursor en pantalla.

## Detección de gestos

Además de la segmentación y del seguimiento de los movimientos oculares, se trabajó en la detección de gestos, en particular el guiño o cierre de uno o ambos ojos. Se realizaron pruebas con el algoritmo final de segmentación, detectando guiños del ojo a partir de la no detección del iris/pupila y traduciendo dicho gesto a acciones como las de hacer clic con el *mouse*. Se trabajó con un parámetro de sensibilidad de los gestos con una escala del 1 al 10. La idea se mostró prometedora, con un potencial aporte a la interacción persona-computadora.

## Interfaz de usuario para la evaluación de la interacción persona-computadora

Para evaluar la interfaz de usuario desarrollada, se examinaron las diferentes utilidades brindadas.

- Selección de cámara web. En los casos de varias cámaras conectadas a un mismo dispositivo, es de vital importancia poder seleccionar con cuál de ellas se quiere trabajar. En la Figura 4.5 se observa un ejemplo donde se puede elegir la cámara web a utilizar.



Figura 4.5 Selección de cámara web.

- Control de brillo. Ante ciertas condiciones de iluminación que imposibiliten la detección y seguimiento del iris, se puede variar forma manual el brillo global de la imagen y visualizarla instantáneamente. Se visualiza un ejemplo de aplicación en las Figuras 4.6 y 4.7 al aumentar el brillo de la imagen, se logra la segmentación del iris.



Figura 4.6 Intento fallido de detección de iris en condiciones desfavorables de fuentes de luz.



Figura 4.7 Detección de iris mejorada con ajuste manual de iluminación.

- Selección de color de referencia. Dependiendo las condiciones de iluminación y de los colores del ambiente se encontró beneficioso para diferenciar la referencia del fondo contar con la posibilidad de elegir el color a utilizar en el objeto de referencia. Para poner en funcionamiento esta utilidad en la interfaz se encuentra el control “Color de referencia” con las opciones: rojo, azul y verde como las posibilidades brindadas. En las Figuras 4.8 y 4.9 se observa un caso con idénticas condiciones y se advierte la falla en la detección utilizando una referencia en color rojo. Al cambiar la referencia a color azul se logra una detección exitosa, haciendo uso de los controles de “color de referencia” en la interfaz.

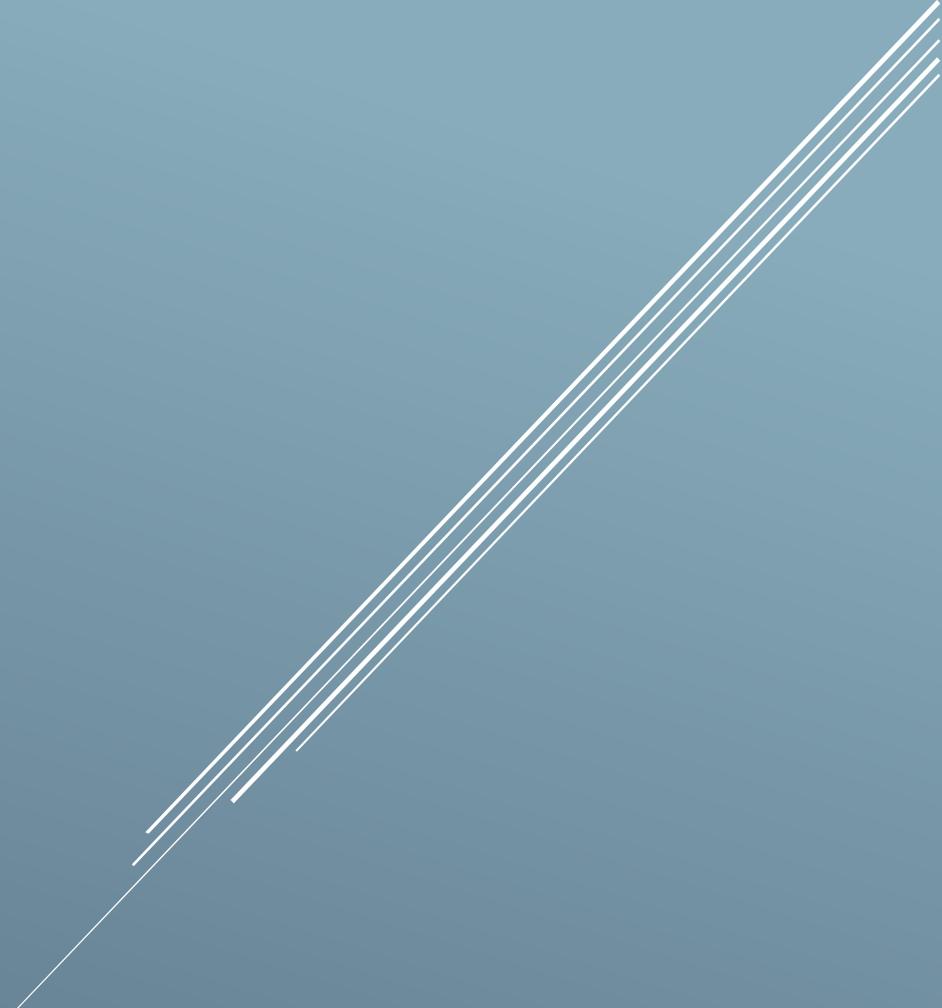
El uso de esta interfaz se mostró correcto para evaluar el comportamiento de diferentes valores en los parámetros tanto de las etapas de segmentación con del seguimiento de los movimientos del globo ocular y también mostró ser efectiva para la interacción persona-computadora.



Figura 4.8 Intento fallido de detección de iris con objeto de referencia en color rojo.



Figura 4.9 Detección exitosa de iris con referencia en color azul en idénticas condiciones de iluminación.



# TRABAJO FUTURO

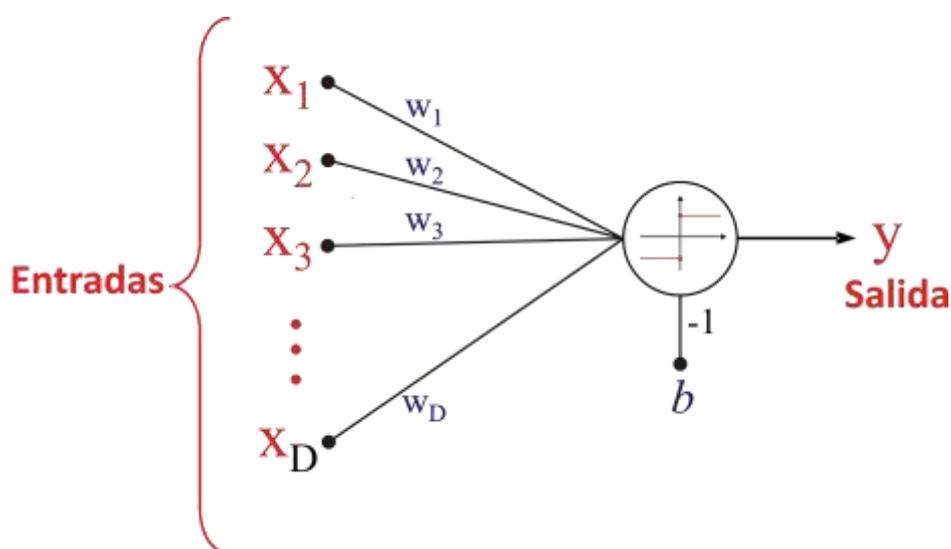
“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Capítulo 5 Trabajo futuro

Se analizaron ciertas mejoras durante la realización del trabajo como, por ejemplo, adicionar una fuente de luz que se adapte a los cambios de iluminación ambiente, así como también la realimentación de dichos cambios al sistema para una detección más eficiente. Además, se analizó el agregado de técnicas nuevas para detección de gestos y mejora en los resultados de segmentación.

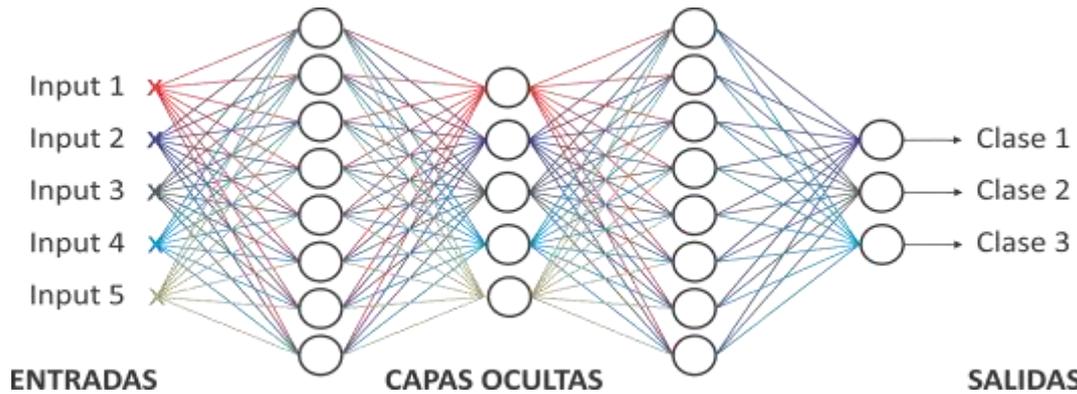
En relación con el enfoque de PDI utilizado para la segmentación, detección y seguimiento es posible, a futuro, aplicar herramientas de inteligencia computacional, tales como redes neuronales artificiales que son modelos matemáticos que imitan el funcionamiento de las neuronas biológicas (Bishop, 2005). Las neuronas actúan como procesadores básicos, pero no lineales. En una primera operación se efectúa la combinación lineal de las entradas con los pesos y luego se aplica una función de activación no lineal (ver Figura 5.1).



**Figura 5.1** Diagrama de una neurona artificial. Los valores de las entradas son pesadas por un conjunto de pesos  $\{W_i\}_{i=1,\dots,D}$ . El valor resultante de esta suma pesada es evaluado por la función de activación para definir el valor de la salida.

Las redes neuronales han demostrado ser sistemas capaces de modelar funciones matemáticas entre un vector de entrada y un vector de salida (Bishop, 2005). Una de sus principales aplicaciones es funcionar como clasificadores, en los que se ingresa con un vector y se logra la probabilidad de pertenencia a una de  $K$  clases.

Un esquema de una red neuronal multicapa (conocidas como red feedforward) (Bishop, 2005) puede verse en la siguiente Figura 5.2. Se observan las entradas (5 en este ejemplo), las conexiones que tienen asociados parámetros internos (pesos) y las salidas, representadas como la probabilidad de cada una de las clases (3 en el ejemplo).



**Figura 5.2** Ejemplo de red neuronal multicapa con 5 entradas, 2 capas ocultas y 3 salidas para clasificar datos de dimensión 5 entre 3 clases posibles.

Las redes neuronales modifican sus parámetros internos a partir de un conjunto de ejemplos de entradas y sus respectivas salidas (*targets*) (Bishop, 2005; Comas et al., 2020). Se utilizan algoritmos de entrenamiento que van modificando los parámetros iterativamente. Existen decenas de algoritmos diferentes, cada uno con sus características particulares. El conocido *backpropagation* (retropropagación del error) ha sido mejorado con enfoques más actuales, como el denominado método Adam. Esto es lo que se conoce como proceso de entrenamiento. Una vez entrenadas, las redes neuronales son capaces de generalizar lo aprendido para predecir nuevas clasificaciones a partir de datos de entrada que no habían sido usados en el proceso de entrenamiento (etapa de consulta, predicción o simulación de la red).

Las redes neuronales convolucionales (CNN, del inglés *Convolutional Neural Networks*) son redes neuronales que, además, en el camino de procesamiento de la entrada, extraen características de imágenes para ser utilizadas como entrada para un clasificador (LeCun et al., 2015, Comas et al., 2020). Así, permiten utilizar imágenes como entrada y obtener una clasificación de estas en la salida. Un ejemplo típico de una CNN se muestra en la Figura 5.3. Las diferentes etapas de procesamiento se representan con tensores. Se puede observar la imagen de entrada de 3 canales (para representar una típica imagen color con tres canales, rojo, azul y verde) y luego la secuencia de operaciones convolucionales y de *pooling* que van compactando la información, hasta llegar a las capas de neuronas indicadas como FC (por *fully connected*) y una capa final de clasificación, indicada como *y* (*softmax*).

Dado el éxito de las CNN desde 2012, aplicadas para clasificar diferentes escenas y objetos contenidos en imágenes, en los últimos años se ha ido más allá, intentando no sólo la clasificación de las imágenes, sino la localización de objetos dentro de las mismas.



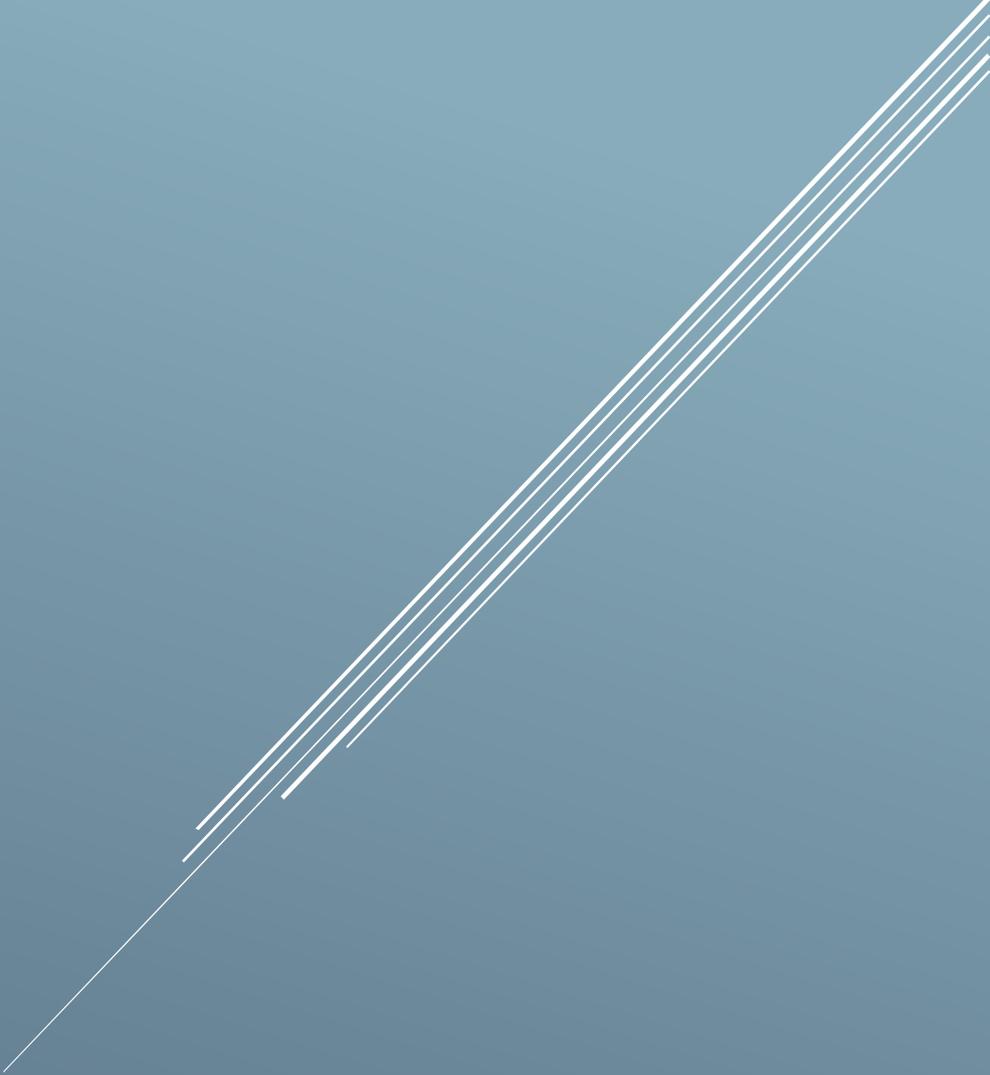
Conocida la dificultad computacional y la gran cantidad de datos que estas redes requieren para entrenarse (pueden requerir semanas de entrenamiento), se recurre al concepto de aprendizaje por transferencia (*transfer learning*) (Akçay et al., 2016; Lucena et al., 2017; Roy et al., 2020; Comas et al., 2020). Este paradigma utiliza una red que ha sido entrenada para otro objetivo. Se aprovecha parte de la red y se entrena para un nuevo objetivo solo una parte de ella, típicamente la etapa final que produce la clasificación (o la regresión, como hace la red usada en YOLO) en el caso de los detectores de objetos.

Para el problema abordado en este Proyecto es posible el entrenamiento con el paradigma de *transfer learning* de una red convolucional de este último tipo mencionado, la que se entrenará con cientos de capturas de rostros en distintas posiciones, con diversidad de colores de ojos, condiciones de luz, formas de ojos, indicando el objeto de interés, en este caso el iris, recuadrado, para su posterior detección automática.

Como se comentó antes, dada la extraordinaria eficiencia en el cálculo de la predicción o detección de este tipo de redes, pueden ser utilizadas en tiempo real, porque el procesamiento de una imagen en tiempo de consulta es más rápido que el tiempo que transcurre entre cuadro y cuadro de la captura de un vídeo.

Esto permitiría el seguimiento eficiente del contorno del iris, y por consecuente, la mejora de la etapa de reconocimiento de éste, para ser aprovechado en las etapas de detección y seguimiento propuestas en este Proyecto.

Esto se sugiere como trabajo futuro inmediato, que, a través de la experiencia adquirida en este tipo de redes en otros campos, se prevé será exitoso y mejorará los resultados obtenidos con el enfoque propuesto.



# CONCLUSIONES

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

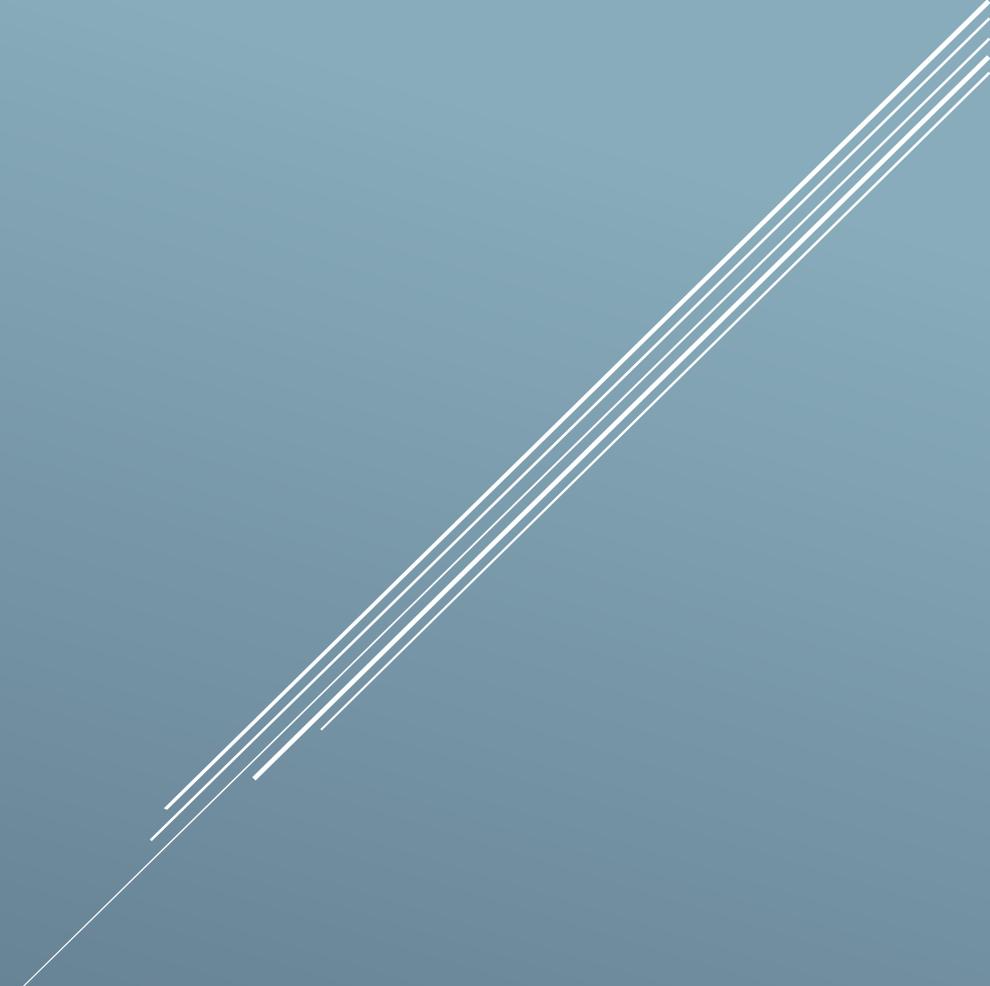
LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Capítulo 6. Conclusiones

Se desarrolló un método que posibilita la segmentación del iris y permite detectar la ubicación relativa del globo ocular, así como la identificación de sus movimientos mediante imágenes obtenidas desde una cámara web, como único dispositivo de captura, sin requerir hardware adicional.

Los resultados de segmentación indican que los métodos propuestos resultan en una solución robusta y adecuada para el problema abordado. El trabajo contribuye a la detección de movimientos del globo ocular, proponiendo una alternativa a los enfoques tradicionales que requieren dispositivos específicos como, por ejemplo, iluminación mediante luz infrarroja. Es importante destacar que el método desarrollado permite realizar ensayos en forma mínimamente invasiva brindando ciertas facilidades para quien sea el usuario. Comparada con dispositivos comerciales existentes en los que el sistema de referencia se determina a partir de la fijación del dispositivo de adquisición sobre la cabeza del usuario (por ejemplo, con uso de marco de lentes), la solución propuesta, a través de un objeto de referencia adhesivo resulta en una experiencia más confortable al usuario y un dispositivo menos invasivo y molesto.

El enfoque propuesto podría verse altamente beneficiado en cuanto a su robustez y sensibilidad a los movimientos del globo ocular al mejorar la exactitud y robustez de la segmentación y detección del iris, objetivo que podría lograrse a través de técnicas de PDI de relativa novedad/actualidad como las propuestas en el Capítulo 5, lo que se plantea como continuación del trabajo presentado en este Proyecto.



# BIBLIOGRAFÍA

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Bibliografía

- Aguirre Dobernack, N. (2016). Procesamiento de imágenes. 3, 42–72.
- Akçay, S., Kundegorski, M.E., Devereux, M., & Breckon, T.P. (2016). “Transfer Learning Using Convolutional Neural Networks for Object Classification within X-Ray Baggage Security Imagery.” In 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 1057–61. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7532519>.
- Bishop, C. (2005). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: Oxford Press.
- Botero, C. G. de P. (2019). LOGOS (Logos-Vestigium (ed.); Primera).
- Comas, D. S., Bouchet, A., Pastore, J. I., Rapacioli, M., Flores, V., & Ballarin, V. L. (2013). Células en cultivos: Segmentación y seguimiento en secuencias de imágenes. In *XIX Congreso Argentino de Bioingeniería (SABI 2013)*. San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Comas, D., & Meschino, G. J. (2014). Segmentación de Imágenes mediante Reconocimiento de Patrones. Material del curso. Escuela y Workshop Argentino en Ciencias de las Imágenes. [http://www.sg6671.com.ar/ecimag2014/c3/ECIMAG2014-Curso-C3\\_Modulo.pdf](http://www.sg6671.com.ar/ecimag2014/c3/ECIMAG2014-Curso-C3_Modulo.pdf).
- Comas, D.S., Meschino, G.J., Ballarin, V.L., Aguilera Díaz, J., Musso, C.G., Rivera, H., Plazzotta, F., Algranati, L., & Luna, D. (2020). “Early Detection of Peritoneal Dialysis Complications through Convolutional Neural Networks.” In *XXII Congreso Argentino de Bioingeniería (SABI 2020)*.
- Cortez Tornello P., Pagnuco I., Pastore J. I., Cuadrado T., Ballarin V., & Abraham G. (2013). Cálculo de distribuciones de micro/nanopartículas utilizando transformada de *Hough*. In *XIX Congreso Argentino de Bioingeniería (SABI 2013)*. San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Eye Tracking para marketing, UX e investigación del consumidor. (2020). <https://www.tobiiipro.com/es/aplicaciones/investigacion-mercado-consumidor/>.
- Gonzalez H., & Velásquez S. (2019). Reconocimiento Facial utilizando Viola-Jones y Patrones Binarios. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 23 (92), pp. 57-63.
- Gonzalez R., & Woods, E. (2002). *Digital image processing* (Vol. 1). Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall. <https://doi.org/10:0-8400-5444-0>.
- HIRU: El primer eye tracker multiplataforma del mundo. Retrieved July 9, 2021, from <https://www.irisbond.com/tecnologia/hiru/>.
- Jensen, O., & Larsen, R. (2008). Implementing the viola-jones face detection algorithm. Technical Univ. of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark. ISSN: 1601-233X.
- Jinyu Zuo, Ratha, N. K., & Connell, J. H. (2008). A new approach for iris segmentation. In 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2008.4563109>.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). “Deep Learning.” *Nature*, 521 (7553), pp. 436–44. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- Lucena, O., Amadeu, J., Moia, V., Souza, R., Valle, E., & Lotufo, R. (2017). “Transfer Learning Using Convolutional Neural Networks for Face Anti-Spoofing.” In 27–34. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59876-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59876-5_4).

- Moravčík T., Bubeníková E., Muzikářová L. (2011). Detection of determined eye features in digital image. *International Journal of Engineering*, 9 (1), pp. 155-160.
- Murillo, V., Fernando, J., Ardila, C., Carlos, J., Marmolejo, C., Felipe, L., & Carlos, E. (2014). Iris Feature Extraction as a Biometric Identification Mechanism. *Revista virtual, Universidad Católica del Norte*, (42), pp. 182–196.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9 (1), pp. 62–66.
- Palomo, P., & Arrazola, J. M. (2010). Quick Glance Control del ordenador por el movimiento de los ojos. 6, pp. 1–27. <http://www.iriscom.org/>.
- Proença, H., Filipe, S., Santos R., Oliveira J., Alexandre L. (2010). The UBIRIS.v2: A Database of Visible Wavelength Iris Images Captured On-The-Move and At-A-Distance, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32 (8), pp. 1529-1535, ISSN: 0162-8828. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TPAMI.2009.66>.
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018) YOLOv3: An Incremental Improvement. *Computer Science*, arXiv: 1804.02767. <http://arxiv.org/abs/1804.02767>
- Roy, S.K., Dubey, S.R., Chanda, B., Chaudhuri, B.B., & Ghosh, D.K. (2020). “TexFusionNet: An Ensemble of Deep CNN Feature for Texture Classification.” *Advances in Intelligent Systems and Computing* 1024: 271–83. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9291-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9291-8_22).
- Seeing Machines, Driver Fatigue Monitoring System: Guardian, <https://www.seeingmachines.com/guardian>).
- Viridiana, J. O., Eric, S. A., & Daniel, R. C. (2015). Procesamiento de imágenes para la etapa de Segmentación en Sistemas de Reconocimiento Biométrico del Iris. August 2014, 1–5. <http://portales.sabes.edu.mx/redi/esp/pdf/REDI01CTI2014.pdf>.



# **APÉNDICE I: REQUERIMIENTOS Y EL CRONOGRAMA PREVISTO**

“Detección de movimientos del globo ocular mediante  
Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-  
computadora”

LUCIANO JOSÉ DI IORIO

## Apéndice I: Requerimientos y cronograma previsto

Se presentan a continuación los documentos correspondientes a la especificación de requerimientos y el cronograma previstos al inicio de este Proyecto.

### Introducción

Este documento contiene la especificación de requerimientos del sistema desarrollado en el Proyecto Final de Ingeniería Electrónica denominado “*Detección de movimientos de globo ocular mediante Procesamiento Digital de Imágenes para la interacción persona-computadora*”.

### Propósito

Este documento tiene como propósito poner en conocimiento los requerimientos necesarios para el desarrollo de una interfaz usuario-computadora que sea controlada mediante la detección de movimientos del globo ocular y otros gestos del usuario.

### Alcance

Esta especificación de requisitos está dirigida a todo usuario que requiera interactuar con una computadora mediante la detección de movimientos del globo ocular (movimientos de los ojos) y otros gestos, y a todo investigador/desarrollador que quiera continuar con este Proyecto, adicionándole mejoras, dándole utilidades extras o haciéndolo parte de un proyecto mayor.

Como todo sistema que permita la interacción con una computadora, conlleva un gran potencial de acción en ingeniería, especialmente en el desarrollo del método/sistema de comunicación/interacción. El sistema desarrollado permite aumentar las capacidades de interacción de personas con movilidad reducida, tanto desde el punto de vista de la comunicación como, posiblemente, del movimiento y traslado de un lugar a otro.

### Definiciones, siglas y abreviaturas

- **MATLAB:** Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con lenguaje de programación propio. Permite el procesamiento de imágenes y armado de interfaz gráfica.

### Referencias

- Especificación de Requisitos según el estándar de IEEE 830. IEEE Std. 830-1998.

## Descripción general

### Perspectiva del Sistema

Esta solución tecnológica será diseñada para la interacción persona-computadora con el potencial de aplicación en múltiples campos, logrando simplificar el manejo de procesos, automatizando otros o el manejo de una PC en circunstancias que lo ameriten.

### Funciones del Sistema

La funcionalidad principal de este producto será la de realizar acciones elementales en una computadora, en principio, con características similares a un mouse convencional. Entre las acciones que permite realizar se encuentran: mover el cursor de la pantalla de la computadora en múltiples direcciones, hacer click, seleccionar elementos, entre otras.

Adicionalmente, se podrían usar estas acciones para manejar dispositivos externos a la computadora, agregando los dispositivos adicionales necesarios.

### Restricciones

- Hardware: computadora con cámara web y cierta capacidad de proceso mínima (aún no determinada).
- Software: MATLAB. En etapas posteriores, podría lograrse una implementación que sólo requiera de ciertas librerías, evitando al usuario final la instalación del MATLAB.
- El diseño deberá ser robusto, adaptable a los distintos tipos de usuarios, considerando diferentes colores de piel y de iris, e iluminación ambiente.
- Interfaz gráfica sencilla, intuitiva, fácil de comprender y de utilizar.

### Suposiciones y dependencias

- Las computadoras utilizadas deberán cumplir con los requerimientos de hardware y software necesario para el funcionamiento del sistema de interacción.
- Se suponen los requerimientos detallados sean estables para el proyecto a desarrollar.

### Requisitos Futuros

Se podría requerir para futuras mejoras del sistema desarrollado:

- Sensor de condiciones de iluminación ambiente para la óptima independencia y robustez del sistema.
- Interfaz para conectarse a otros dispositivos.

## Requisitos específicos

### Requisitos comunes de las interfaces

#### Interfaces de usuario

Esta interfaz dispondrá de ventanas con imágenes y videos, botones y menús para la configuración, calibración, parametrización y utilización de la interfaz usuario-computadora.

#### Interfaces de hardware

Como elementos físicos tecnológicos, se utilizará una computadora con una cámara web de calidad media.

#### Interfaces de software

Será necesario contar, en principio, con un sistema operativo Windows 7 o una versión posterior y tener instalado el software MATLAB R2017 o posterior.

#### Interfaces de comunicación

Se utiliza el lenguaje programación propio de MATLAB, con el cual se logra la intercomunicación de todas las interfaces: usuario, hardware y software.

### Requerimientos funcionales

**Identificación del requerimiento:** RF01.

**Nombre del requerimiento:** Calibración del sistema.

**Características:** Los usuarios deberán calibrar el sistema en cada ocasión que requieran usarlo. Es condición necesaria para el correcto direccionamiento del cursor.

**Descripción:** Consiste en referenciar los alcances de los ojos a la pantalla. El sistema puede ser utilizado todo el tiempo luego de cada calibración. Cada cambio de posición y/o de usuario debe recalibrarse. Recomendación: que el usuario se ubique frente a la pantalla de la computadora de tal manera que su línea de visión coincida con el centro de la pantalla.

**Requerimiento NO funcional:** Rendimiento, Adaptabilidad, Fiabilidad.

**Prioridad:** ALTA

**Identificación del requerimiento:** RF02.

**Nombre del requerimiento:** Mover direccionalmente el cursor.

**Características:** Incluye todas las posiciones de la pantalla de trabajo. El cursor se mueve por pasos en ambos ejes ( $x$  e  $y$ ).

**Descripción:** Es la función principal del sistema. Consiste en determinar el movimiento del cursor en la pantalla de acuerdo con el movimiento detectado del globo ocular. El algoritmo utilizado para determinar el movimiento del cursor debe ser suficientemente robusto de modo que el movimiento sea suave y permita una correcta interacción del usuario.

**Requerimiento NO funcional:** Rendimiento, Adaptabilidad, Fiabilidad.

**Prioridad:** ALTA.

**Identificación del requerimiento:** RF03.

**Nombre del requerimiento:** Hacer *Click*.

**Características:** Configurable para activar el click por diferentes métodos de entrada.

Con parámetros ajustable.

**Descripción:** Simula las funciones de click derecho/izquierdo del convencional mouse o ratón y permite traducir gestos del usuario a acciones concretas a realizar por la interfaz.

**Requerimiento NO funcional:** Rendimiento, Adaptabilidad, Fiabilidad.

**Prioridad:** MEDIA

## Requerimientos no funcionales

### Rendimiento

Los métodos utilizados para la detección de los movimientos del globo ocular y para la detección de los gestos deberán ser lo suficientemente rápidos para permitir una interacción adecuada (en tiempo real) entre el usuario y la interfaz y lo suficientemente robustos para garantizar una correcta interacción, esto es, la correcta detección de los movimientos y de los gestos. Se establece que el sistema implementado deberá funcionar correctamente con los siguientes requisitos de hardware mínimo: PC con Windows 7 o posterior, con microprocesador Intel Core i3 3100, 4GB de memoria RAM y MATLAB R2017 y cámara web. Se establecerán pruebas con el fin de verificar el cumplimiento de estos requerimientos y, en función de los resultados, se establecerá la optimización de la interfaz.

### Adaptabilidad

El sistema deberá funcionar correctamente para diferentes usuarios, previa calibración.

### Fiabilidad

El sistema debe tener una interfaz de uso intuitiva y sencilla, que responda a las necesidades básicas para la interacción con persona-computadora: correcta detección de los movimientos del globo ocular (para movimiento del cursor) y detección de otros gestos (amplían la capacidad de interacción).

## Cronograma previsto del Proyecto

Actividad	Meses del primer año											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisión de trabajos realizados	X	X	X									
Selección de trabajos			X	X								
Puesta en común de problemas/ soluciones				X	X							
Preprocesamiento de imágenes						X	X	X	X			
Segmentación del Iris										X	X	X
Anotaciones para informe			X	X		X	X			X		

Actividad	Meses del segundo año											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Calibración	X											
Configuración de video/ Toma de frames		X										
Procesamiento de Posición de Iris			X	X								
Desarrollo de interfaz gráfica					X	X	X					
Escritura y revisión de informe preliminar	X	X	X		X							
Informe final							X					

X: Posibles presentaciones ante Director/Potencial Usuario.