

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO**

División de Estudios de Posgrado e Investigación

## **RASTREO DINÁMICO PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS PUPILAS BASADO EN TÉCNICAS DE PDI CON APLICACIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE LESIONES OCULARES SACÁDICAS**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

PRESENTA:  
**LIC. SALVADOR MEDRANO ROMERO**

DIRECTORES DE TESIS:  
**M. en C. MARÍA GUADALUPE MEDINA BARRERA**  
**M. en C. JOSÉ JUAN HERNÁNDEZ MORA**

"2013, Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Apizaco, Tlax., 09 de Diciembre de 2013

ASUNTO: **Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.**

**M. en C. MARIA GUADALUPE MEDINA BARRERA**  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN.  
P R E S E N T E.

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la **Comisión Revisora** para el trabajo de tesis de maestría que presenta el **Lic. Salvador Medrano Romero**, con número de control **M06370518** candidato al grado de **Maestro en Sistemas Computacionales** y egresado del **Instituto Tecnológico de Apizaco**, cuyo tema es **"RASTREO DINÁMICO PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS PUPILAS BASADO EN TÉCNICAS DE PDI CON APLICACIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE LESIONES OCULARES SACÁDICAS"**, fue:

**A P R O B A D O**

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

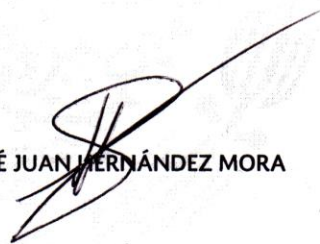
Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISIÓN REVISORA



**M.C. MARÍA GUADALUPE MEDINA BARRERA**



**M.C. JOSÉ JUAN HERNÁNDEZ MORA**



**DR. JOSÉ FEDERICO RAMÍREZ CRUZ**



**DR. JOSÉ CRISPÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

C. p.- Interesado.

"2013, Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Apizaco, Tlax., 09 de Diciembre de 2013

No. de Oficio: DEPI/986/13

ASUNTO: **Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.**

**LIC. MEDRANO ROMERO SALVADOR**  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN  
SISTEMAS COMPUTACIONALES  
No. de Control: **M06370518**  
P R E S E N T E.

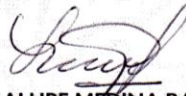
Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: **I Tesis de Grado por Proyecto de Investigación**, de la **Maestría en Sistemas Computacionales**, que presenta con el tema: **"RASTREO DINÁMICO PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS PUPILAS BASADO EN TÉCNICAS DE PDI CON APLICACIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE LESIONES OCULARES SACÁDICAS"** y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

#### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadernado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**PENSAR PARA SERVIR, SERVIR PARA TRIUNFAR®**



**M. C. MARIA GUADALUPE MEDINA BARRERA**  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN.



Secretaría de Educación Pública  
Instituto Tecnológico de Apizaco  
División de Estudios de Posgrado  
e Investigación

MGMB/mebr.

C.p. Expediente.



Av. Instituto Tecnológico S/N, Apizaco, C.P. 90300 Apizaco, Tlaxcala.  
Tels. 01 241 417 20 10, Conmut. 101 Ext. 146,  
e-mail: [posgrado@itapizaco.edu.mx](mailto:posgrado@itapizaco.edu.mx), [www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)



---

## Agradecimientos.

*Quiero agradecer a todas las personas que me impulsaron para lograr concluir este ciclo tan importante en mi vida profesional.*

*A mis padres Paula Gloria Romero González y José de Jesús Medrano Sánchez por apoyarme todo el tiempo, darme lo necesario y depositar su plena confianza y cariño en mí.*

*A mi directora de tesis M. en C. María Guadalupe Medina Barrera por todo su tiempo, sus consejos, su aliento, amistad y sobre todo su paciencia a lo largo del proyecto.*

*A mi codirector de tesis M. en C. José Juan Hernández Mora por su apoyo, tiempo y por despertar el apetito de conocimiento.*

*A mi tutor Dr. José Federico Ramírez Cruz por encaminarme en el trabajo y compartir su sabiduría en el transcurso de la maestría.*

*A mi revisor Dr. José Crispín Hernández Hernández por el tiempo concedido a la revisión de la tesis.*

*Al Dr. Luis Carlos Altamirano Robles quien tuvo el papel de cotutor durante mi estancia en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por hacerme sentir como en casa y brindarme lo necesario para alcanzar los objetivos de la tesis.*

*A mis compañeros de generación por brindarme su apoyo y amistad dentro y fuera de las aulas.*

*A cada uno de los docentes de la Maestría en Sistemas Computacionales por sus enseñanzas.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo otorgado mediante la beca no. 428661.*

*A mi novia Cristina Romero Torres por apoyarme cada día incondicionalmente, por su paciencia durante todo este ciclo, por alentarme cuando más lo necesitaba y por motivarme con el Amor que solo ella puede darme.*

*Y por último a mi hermano M. en S. C. Jesús Gustavo Medrano Romero por permitirme construir mi camino al lado del suyo, sin duda es el mejor ejemplo que pude haber tenido.*

---

## Resumen.

En el presente trabajo de tesis se presenta una metodología para desarrollar e implementar dos algoritmos de rastreo utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes cuya finalidad principal es detectar la posición de las pupilas de una persona para posteriormente seguirlas durante el transcurso de una secuencia de vídeo, esto se hace con el propósito de crear una herramienta que apoye a los especialistas en enfermedades oculares a diagnosticar con mayor eficiencia y precisión a sus pacientes.

La metodología se da de la siguiente manera: se conformó una base de videos para realizar las pruebas, las personas se situaron frente a una cámara infrarroja enfocada en sus ojos aproximadamente a treinta centímetros de distancia, frente a ellos se proyecta una animación que es controlada y cuyo objetivo es propiciar los movimientos oculares, el rostro de las personas está iluminado con una lámpara infrarroja situada a tres metros de distancia de ellas, de esta forma se consiguieron escenas con las mismas características técnicas. Posteriormente se procesan los videos cuadro a cuadro, primero se utiliza un algoritmo para convertir cada uno de ellos a su equivalente en escala de grises ya que originalmente se encuentran en un formato a color, después se realiza una segmentación, el tercer paso es realizar el rastreo de las pupilas hasta que el video finalice o las pupilas desaparezcan de él, por último se registran los movimientos y coordenadas de las pupilas para cada uno ellos.

La combinación de estas técnicas posibilita un sistema capaz de proporcionar a los profesionales información con mediciones precisas en salud visual como apoyo en sus diagnósticos.

---

## **Abstract.**

In this thesis presents a methodology to develop and implement two tracking algorithms using digital image processing techniques whose main purpose is to detect the position of the pupils of a person to follow them later in the course of a video sequence, this is done in order to create a tool that supports to specialists to diagnose to their patients.

The methodology is given in the following way: it formed a video basis to perform the tests, the people were situated in front of an infrared camera focused on his eyes to thirty centimeters of distance approximately, in front of them is projected animation that is controlled and whose objective is promote eye movements, people's face is illuminated with an infrared lamp located three meters from them, in this way got scenes with the same technical characteristics. Subsequently, the videos are processed frame by frame, an algorithm is first used to convert each of them to their equivalent grayscale because originally found in a color format, after performing a segmentation, the third step is to perform the tracking pupils until the video ends or disappear pupils, finally recorded the movements and pupil coordinates for each of them.

The combination of these techniques allows a system to provide information to professionals in eye diseases with measurements to support in their diagnoses.

---

## Índice.

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema.	2
1.2 Justificación.	3
1.3 Objetivos.	3
1.3.1 Objetivo general.	3
1.3.2 Objetivos específicos.	3
1.4 Pregunta de investigación.	4
1.5 Alcances y limitaciones.	4
1.5.1 Alcances.	4
1.5.2 Limitaciones.	4
1.6 Análisis del estado del arte.	5
<b>Capítulo 2: Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1 Sistema visual humano.	12
2.1.1 Estructura del sistema visual humano.	12
2.1.2 Movimientos oculares.	13
2.1.3 Movimientos para el desplazamiento de la mirada.	14
2.2 Procesamiento digital de imágenes.	15
2.2.1 Adquisición de la imagen.	16
2.2.2 Preprocesamiento de la imagen.	17
2.2.2.1 Conversión a escala de grises.	17
2.2.2.2 Binarización por umbral.	17
2.2.2.3 Brillo.	18
2.2.2.4 Contraste.	18
2.2.2.5 Operaciones morfológicas.	19
2.2.2.5.1 Erosión binaria.	19
2.2.2.5.2 Dilatación binaria.	20
2.3 Segmentación de una imagen.	20
2.3.1 Técnicas de segmentación.	21
2.3.1.1 Métodos basados en el histograma.	21
2.3.1.2 Detección de bordes.	21
2.3.1.3 Métodos de crecimiento de regiones.	21
2.3.1.4 Método del valor umbral (umbralización).	23
2.4 Representación y descripción.	23
2.5 Reconocimiento e interpretación de una imagen.	24
2.6 Procesamiento digital de video.	24
2.6.1 Video analógico.	25
2.6.2 Video digital.	26
2.6.3 Tracking.	26
2.6.3.1 Punto de Tracking.	27
2.6.3.2 Técnicas de tracking.	27

2.6.3.2.1 Seguimiento basado en rasgos (características).	27
2.6.3.2.2 Algoritmos de seguimiento basado en filtros de predicción.	28
2.6.3.2.2.1 Filtro Kalman.	28
2.6.3.2.2.2 Filtro de partículas.	30
<b>Capítulo 3: Metodología</b>	<b>32</b>
3.1 Metodología general.	33
3.2 Obtención de las imágenes.	34
3.3 Conversión a escala de grises.	37
3.4 Segmentación.	38
3.5 Tracking del iris.	39
3.5.1 Filtro de partículas.	39
3.5.2 Seguimiento dinámico de rasgos.	42
3.6 Generación de la información relevante.	45
<b>Capítulo 4: Desarrollo</b>	<b>46</b>
4.1 Construcción del prototipo físico.	47
4.2 Obtención de las imágenes.	48
4.3 Conversión a escala de grises.	48
4.4 Segmentación de la pupila.	49
4.4.1 Segmentación para el filtro de partículas.	49
4.4.2 Segmentación para el seguimiento dinámico de rasgos.	50
4.5 Tracking de la pupila.	51
4.5.1 Filtro de partículas.	51
4.5.2 Seguimiento dinámico de rasgos.	53
<b>Capítulo 5: Experimentación y resultados</b>	<b>57</b>
5.1 Experimentación.	58
5.2 Base de pruebas.	59
5.3 Experimentación con el filtro de partículas.	60
5.3.1 Experimento 1. Prueba sobre personas con pupilas en tono oscuro.	60
5.3.2 Experimento 2. Prueba sobre personas con pupilas en tono claro.	61
5.3.3 Experimento 3. Prueba sobre personas con la mirada hacia abajo.	62
5.3.4 Experimento 4. Prueba sobre personas con los ojos cerrados.	63
5.3.5 Experimento 5. Prueba sobre personas con pestañas con rímel.	64
5.4 Experimentación con el filtro de seguimiento dinámico de rasgos.	67
5.4.1 Experimento 1. Prueba sobre personas con pupilas en tono oscuro.	67
5.4.2 Experimento 2. Prueba sobre personas con pupilas en tono claro.	68
5.4.3 Experimento 3. Prueba sobre personas con la mirada hacia abajo.	69
5.4.4 Experimento 4. Prueba sobre personas con los ojos cerrados.	70
5.4.5 Experimento 5. Prueba sobre personas con pestañas con rímel.	71
5.5 Resultados generales.	73



---

<b>5.6 Generación de información relevante.</b>	<b>75</b>
<b>5.6.1 Gráficos para videos con personas con pupilas en tonos oscuros.</b>	<b>76</b>
<b>5.6.2 Gráficos para videos con personas con pupilas en tonos claros.</b>	<b>78</b>
<b>5.6.3 Gráficos para videos con personas con pestañas con rímel.</b>	<b>79</b>
<b>5.7 Comparación con otros trabajos.</b>	<b>81</b>
<b>Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>83</b>
<b>6.1 Conclusiones.</b>	<b>84</b>
<b>6.2 Comentarios finales.</b>	<b>86</b>
<b>6.3 Trabajo futuro.</b>	<b>86</b>
<b>Anexo I Carta de satisfacción del cliente.</b>	<b>87</b>
<b>Anexo II Estancia BUAP.</b>	<b>89</b>
<b>Anexo III Artículo enviado a CIIA.</b>	<b>91</b>
<b>Anexo IV Artículo enviado a ROC&amp;C.</b>	<b>101</b>
<b>Anexo V Artículo enviado a la revista SIPIJ.</b>	<b>110</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>122</b>

---

## Índice de figuras.

<b>Figura 2.1</b>	Estructura del ojo humano.	13
<b>Figura 2.2</b>	Músculos encargados de los movimientos oculares.	14
<b>Figura 2.3</b>	Etapas fundamentales del procesamiento digital de imágenes.	16
<b>Figura 2.4</b>	Ejemplo de digitalizador de imágenes (scanner).	16
<b>Figura 2.5</b>	Espectro vectorial de colores.	17
<b>Figura 2.6</b>	Aumento o disminución de brillo.	18
<b>Figura 2.7</b>	Aumento o disminución de contraste.	19
<b>Figura 2.8</b>	Ejemplo de crecimiento de regiones.	22
<b>Figura 2.9</b>	Punto de tracking.	27
<b>Figura 2.10</b>	Ciclo del algoritmo de Kalman.	29
<b>Figura 2.11</b>	Diagrama de bloques del filtro de partículas.	31
<b>Figura 3.1</b>	Diagrama del sistema propuesto.	33
<b>Figura 3.2</b>	Tomas de distintas cámaras.	35
<b>Figura 3.3</b>	Captura utilizando iluminación infrarroja y cámara infrarroja.	35
<b>Figura 3.4</b>	Webcam y lámpara infrarrojas utilizadas.	36
<b>Figura 3.5</b>	Diagrama del prototipo físico.	37
<b>Figura 3.6</b>	Imagen original y su equivalente en escala de grises.	38
<b>Figura 3.7</b>	Imagen original (arriba), imagen segmentada por crecimiento de regiones (abajo izquierda) e imagen segmentada por método de umbralización (abajo derecha).	39
<b>Figura 3.8</b>	Primera imagen de donde se obtienen características relevantes para lograr el rastreo.	40
<b>Figura 3.9</b>	Imagen con el pixel semilla en rojo.	41
<b>Figura 3.10</b>	Partículas inicializadas en posiciones aleatorias.	41
<b>Figura 3.11</b>	Ejemplo de una gráfica de pastel en donde las partes más grandes pertenecen a las partículas más parecidas en color al pixel semilla.	42
<b>Figura 3.12</b>	Imagen completa (izquierda) y limitación de zona de búsqueda (derecha).	43
<b>Figura 3.13</b>	Imagen original (izquierda) e imagen resultante de la segmentación por Umbralización (derecha).	44
<b>Figura 3.14</b>	Imagen umbralizada (arriba), imagen erosionada (en medio) e imagen dilatada (abajo).	45
<b>Figura 4.1</b>	Prototipo físico. Base para el rostro, cámara, lámpara y computadora.	47
<b>Figura 4.2</b>	Imágenes obtenidas.	48
<b>Figura 4.3</b>	Primer cuadro del video (a) y pupilas segmentadas de dicho cuadro (b).	49
<b>Figura 4.4</b>	Imagen original (arriba) e imagen segmentada por umbralización (abajo).	50
<b>Figura 4.5</b>	Inicialización de las partículas aleatoriamente (puntos verdes) y obtención del pixel semilla (asterisco amarillo).	51
<b>Figura 4.6</b>	Muestra del filtro de partículas.	52
<b>Figura 4.7</b>	Imagen completa (izquierda) y zona de búsqueda (derecha).	53
<b>Figura 4.8</b>	Imagen en escala de grises (izquierda) e imagen umbralizada (derecha).	54
<b>Figura 4.9</b>	Imagen segmentada (arriba), erosionada (en medio) y dilatada (abajo).	54
<b>Figura 4.10</b>	Patrones de interés marcados en la imagen original.	55

<b>Figura 4.11</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos.	56
<b>Figura 5.1</b>	Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con ojos en tono oscuro.	60
<b>Figura 5.2</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos en tono oscuro.	60
<b>Figura 5.3</b>	Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con ojos en tono claro.	61
<b>Figura 5.4</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos en tono claro.	61
<b>Figura 5.5</b>	Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con la mirada hacia abajo.	62
<b>Figura 5.6</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos mirando hacia abajo.	62
<b>Figura 5.7</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos cerrados recuperando los centros de atención.	63
<b>Figura 5.8</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos cerrados sin recuperar el centro de atención del lado izquierdo.	63
<b>Figura 5.9</b>	Resultado de los pasos del filtro de partículas en ojos con pestañas con rímel.	64
<b>Figura 5.10</b>	Muestra del filtro de partículas sobre ojos con pestañas con rímel.	64
<b>Figura 5.11</b>	Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con ojos en tonos oscuros.	67
<b>Figura 5.12</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos en tonos Oscuros.	67
<b>Figura 5.13</b>	Resultado de los pasos de filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con ojos en tonos claros.	68
<b>Figura 5.14</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos en tonos claros.	68
<b>Figura 5.15</b>	Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con la mirada hacia abajo.	69
<b>Figura 5.16</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos mirando hacia abajo.	69
<b>Figura 5.17</b>	Resultado de los pasos del seguimiento dinámico de rasgos en personas con los ojos cerrados.	70
<b>Figura 5.18</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos cerrados.	70
<b>Figura 5.19</b>	Resultado de los pasos del seguimiento dinámico de rasgos en ojos con pestañas con rímel.	71
<b>Figura 5.20</b>	Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos con pestañas con rímel.	71
<b>Figura 5.21</b>	Gráfica de coordenadas para pupilas en tonos oscuros.	76
<b>Figura 5.22</b>	Gráfica frontal de pupilas en tonos oscuros.	77
<b>Figura 5.23</b>	Gráfica aérea de pupilas en tonos oscuros.	77
<b>Figura 5.24</b>	Gráfica de coordenadas para ambas pupila.	78
<b>Figura 5.25</b>	Gráfica frontal de pupilas en tonos claros.	78
<b>Figura 5.26</b>	Gráfica aérea de pupilas en tonos claros.	79
<b>Figura 5.27</b>	Gráfica de coordenadas para ojos con pestañas con rímel.	79
<b>Figura 5.28</b>	Gráfica frontal de ojos con pestañas con rímel.	80
<b>Figura 5.29</b>	Gráfica aérea de ojos con pestañas con rímel.	80

---

## Índice de tablas.

<b>Tabla 1.1</b> Análisis histórico de trabajos relacionados.	8
<b>Tabla 5.1</b> Características de las personas a las que se les tomaron los videos.	59
<b>Tabla 5.2</b> Falsos positivos y negativos en el filtro de partículas.	65
<b>Tabla 5.3</b> Respuesta del filtro de partículas al cierre de los ojos.	66
<b>Tabla 5.4</b> Falsos positivos y negativos en el seguimiento dinámico de rasgos.	72
<b>Tabla 5.5</b> Respuesta del seguimiento dinámico de rasgos al cierre de los ojos.	73
<b>Tabla 5.6</b> Comparación de los tiempos de ejecución.	74
<b>Tabla 5.7</b> Efectividad de los filtros agregando ruido.	75
<b>Tabla 5.8</b> Comparación con otros trabajos.	81

---

# ***CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN***

En este capítulo se hace una descripción del problema a resolver, se mencionan los alcances y limitaciones del proyecto, además de los objetivos específicos. Por último se muestra un análisis del estado del arte con la finalidad de conocer trabajos relacionados.

---

## 1.1 Descripción del problema.

La vista es quizá el sentido más importante con el que cuenta el ser humano, ya que por medio de ella aprende la mayor parte del conocimiento a lo largo de su vida y sin ella desenvolverse dentro de su entorno sería un proceso muy complicado. Actualmente los factores que llegan a ocasionar algún trastorno en los ojos están en aumento y van desde una mala alimentación hasta el uso desmedido de pantallas o monitores que son dispositivos que actualmente se pueden encontrar casi en cualquier lado y cuyo uso en esta época es imprescindible.

Por estos motivos existe un incremento en la necesidad de contar con herramientas de apoyo para los especialistas en salud visual, que sean capaces de detectar los principales trastornos visuales y proporcionar información más detallada y precisa que ayude a la generación de diagnósticos más exactos, así como tratamientos más adecuados para cada paciente, todo esto teniendo como base la experiencia médica.

Unos de los principales trastornos en la vista y cuya incidencia es considerable, son los relacionados a los movimientos oculares sacádicos, que colaboran en el proceso de aprendizaje, la lectura, la atención a objetos móviles e inmóviles y cuya importancia es vital puesto que tienen la responsabilidad del 80 % del total de nuestra visión. Hoy en día los médicos especialistas realizan estudios y exámenes de forma manual para detectar este tipo de lesiones y los resultados dependen en gran medida de la experiencia de quien los aplica.

Desarrollar una aplicación que sustituya los métodos actualmente utilizados con la finalidad de mejorar la exactitud de los estudios es posible mediante técnicas computacionales. El problema que se aborda en este trabajo es contar con un sistema que permita analizar y procesar imágenes detalladas de los ojos de las personas que se someten a los estudios visuales, además, puesto que la problemática está orientada a los trastornos sacádicos es primordial implementar un método de rastreo enfocado en las pupilas de las personas, ya que el cimienta de este tipo de estudios es observar detalladamente lo que sucede en los órganos oculares cuando se dan los movimientos sacádicos. Es por ese motivo que se adecuaron dos métodos de visión artificial a las características de la problemática para el rastreo de objetos, logrando hacer una comparación entre ellos dos y poder definir cuál es el más adecuado para este tipo de necesidades.

---

## **1.2 Justificación.**

Las enfermedades oculares son un problema que se puede presentar en cualquier tipo de persona, nadie está exento de padecer algún tipo de lesión relacionada al sentido de la vista. La responsabilidad de los médicos especializados en la materia aumenta día a día debido al incremento de los factores que pueden llevar a una persona a requerir de sus servicios y es precisamente en ese punto que se presenta la necesidad de un diagnóstico detallado y lo más exacto posible que evite problemas mayores en el futuro. Específicamente hablar de los trastornos relacionados con los movimientos sacádicos es empezar a explorar un tema que afecta tanto a la gente que los padece como a los especialistas que no cuentan con un sistema que analice a detalle dichos problemas. Actualmente los estudios que realizan tanto los optometristas como los oftalmólogos están basados en la experiencia de cada uno de ellos y en ocasiones los diagnósticos finales podrían ser más exactos si se contara con herramientas que ayudaran a estos profesionales.

El desarrollo tecnológico es un tema de actualidad y de crecimiento y puede ser aplicado a cualquier área, como en este caso lo es en la medicina.

Actualmente no hay indicios de la existencia de un software que contenga las características necesarias para satisfacer las exigencias antes mencionadas, los especialistas en salud visual tendrían un soporte al contar con una aplicación que analice detalladamente el órgano visual humano mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, dando como resultado un diagnóstico preciso producto de la combinación de un análisis minucioso computarizado junto con la experiencia de los médicos.

## **1.3 Objetivos.**

- **1.3.1 General.**
  - Desarrollar e implementar dos algoritmos de procesamiento digital de imágenes para segmentar y seguir las pupilas de un paciente con aplicación en la identificación de lesiones oculares sacádicas y determinar el más efectivo.
  
- **1.3.2 Específicos.**
  - Segmentar las pupilas de los ojos en el primer cuadro del video.
  - Implementar un algoritmo de seguimiento (tracking) para el rastreo de las pupilas en tiempo real (filtro de partículas).

- 
- Implementar un segundo algoritmo de rastreo (seguimiento dinámico de rasgos).
  - Determinar la posición de las pupilas en términos de coordenadas en cada cuadro del video, así como la dirección del movimiento. Estos datos serán utilizados para la identificación de lesiones oculares sacádicas.
  - Realizar pruebas de desempeño para verificar la eficiencia de los dos algoritmos de rastreo implementados y determinar el proceso más eficiente.

#### **1.4 Pregunta de investigación.**

¿Es posible obtener información de coordenadas y dirección de movimiento de las pupilas a partir de técnicas de procesamiento digital de imágenes, para ser utilizadas en la identificación de lesiones oculares sacádicas?

#### **1.5 Alcances y limitaciones.**

##### **1.5.1 Alcances.**

- Se trabaja con todo tipo de pacientes sin importar la forma de los ojos ni el color de piel.
- El sistema ubica la posición específica (coordenadas) de las pupilas.
- Se analizan todos los cuadros de una secuencia de video con una duración determinada.

##### **1.5.2 Limitaciones.**

- Se trabaja con imágenes en las que se controla la iluminación por lo que no se trata el problema de destellos luminosos.
- El sistema no arroja un diagnóstico del paciente.
- Los estudios requieren personas en condiciones específicas tales como:
  - No portar ningún tipo de lentes, gafas o lentes de contacto.
  - No llevar maquillaje mucho menos en tonalidades oscuras.
- En pacientes con alguna enfermedad ocular que pueda interferir en los estudios, se someterá a una previa evaluación por el médico para determinar si el estudio será confiable.



---

## 1.6 Análisis del estado del arte.

Existen diferentes trabajos relacionados al presente proyecto, todos utilizan diferentes técnicas de procesamiento digital de imágenes según sus propios objetivos. A continuación se muestra un resumen de los trabajos similares más importantes, las técnicas más utilizadas y la finalidad de su aplicación.

La mayoría de los trabajos está desarrollado en base a un típico modelo de visión artificial en donde se encuentran las fases de: adquisición de imágenes, preprocesamiento de las imágenes (mejora), segmentación, representación y descripción y reconocimiento e interpretación.

En [Li et al., 2008] utilizan un dispositivo similar a unas gafas en cuya armazón se encuentra un diodo emisor de luz infrarroja y dos cámaras, la primera enfocada en uno de los ojos de la persona y la segunda tiene su atención en lo que la persona está observando. Este dispositivo permite saber hacia dónde se dirige la mirada de una persona utilizando una malla de 3 X 3 cuadros que son superpuestos a las imágenes obtenidas de los ojos, primero se realiza un aumento de brillo y una técnica para aumentar el contraste y con esto poder identificar las zonas que pudieran ser la pupila o parte de ella, después se utiliza una umbralización para separar dichas zonas y por último se aplican dos operaciones morfológicas con la intención de eliminar pequeños distractores que no forman parte de la pupila. Una vez que se cumplen estos pasos se procede a superponer la malla a la imagen procesada y chequear cuáles de los 9 cuadros son tocados por el área que conforma a la pupila y de ese modo se puede saber hacia dónde se está dirigiendo la mirada. La ventaja principal de utilizar el armazón de gafas es que no importa que la persona mueva o gire la cabeza ya que todos los componentes físicos se mueven al mismo tiempo y en la misma dirección. Un dispositivo similar es utilizado en [Sadri et al., 2012] en donde se diseñó un dispositivo de captura de imágenes de un ojo montando una cámara y un foco infrarrojo en un casco para la cabeza de una persona, la finalidad de este trabajo es segmentar la pupila mediante el método de umbralización y posteriormente implementar el filtro de partículas para rastrear dicha pupila.

En [Rodríguez, 2009] se aplica el filtro de partículas al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes. Se utiliza una cámara que obtiene imágenes a color en formato RGB. No se aplica ningún filtro para mejorar las imágenes únicamente se utiliza la umbralización para encontrar el o los objetos que se encuentran dentro de las imágenes y posteriormente se aplican todos los pasos del filtro de partículas.

Otro trabajo en donde se muestra el filtro de partículas es en [Chaparro, 2009] en donde la finalidad de su aplicación es rastrear objetos y personas, en este trabajo no se aborda el

---

problema de oclusión de las zonas de interés y el programa final tiene una velocidad lenta en su procesamiento. Utiliza el método de umbralización y sustracción de fondo para pre procesar las imágenes.

En [Díaz et al., 2011] se puede observar la extracción de características del iris con el objetivo de crear una firma digital única para cada persona con la información que es extraída. Utiliza la base de imágenes CASIA que está conformada en su totalidad por fotos de ojos capturadas con cámara infrarroja. El primer cálculo es el histograma de las imágenes y gracias a las tomas siempre se observan tres picos en el gráfico por lo que los valles son identificables. Esto permite hacer una segmentación por umbralización automática puesto que todas las imágenes poseen las mismas características. Posteriormente se lleva a cabo la discriminación de zonas que hayan sido segmentadas pero que no pertenezcan al iris esto se logra con operaciones morfológicas. Por último se procede a normalizar las imágenes totalmente segmentadas para pasarlas de su forma circular a una forma rectangular. Con esto se obtiene una imagen con características únicas por cada persona.

Otra de las vertientes relacionadas al rastreo de la mirada son los dispositivos *eye trackers* que utilizan sistemas especiales, diseñados para saber qué es lo que una persona observa cuando está frente a una computadora o un celular. Estos sistemas son utilizados por ejemplo para conocer si una página web tiene el impacto que se desea sobre los usuarios que la frecuentan. Los dispositivos que se utilizan son de tres tipos principalmente, los que se ubican en el rostro de una persona mediante una gafas, los que se encuentran adaptados a un monitor de computadora y algunas aplicaciones que pueden ser ejecutadas desde un celular [Moreno, 2013], [Hassan y Herrero, 2007] y [Chau y Betke 2005]. Algunos estudios indican que no todas las personas pueden utilizar estos aparatos debido a que la calibración no se lleva a cabo correctamente por factores como el uso de lentes de contacto.

Otro tipo de aplicaciones son las enfocadas en identificar el iris de las personas, en donde no es necesario aplicar un rastreo ya que el objetivo se puede alcanzar con tomar solo algunas fotos de un ojo de una persona. En [Díaz et al., 2011] mediante la foto del iris humano es posible crear una firma digital única por cada persona, en este trabajo se utilizó la base datos CASIA que está conformada en su totalidad por imágenes de iris tomadas con iluminación infrarroja, se aplica una segmentación por medio del análisis del histograma para separar la pupila del resto de la imagen y posteriormente poder convertir el área segmentada (circular) en una imagen rectangular mediante normalización y como paso final se aplica una codificación de textura que da como resultado la firma digital. Una aplicación enfocada en la identificación del iris se puede encontrar en [Llaca et al., 2012]

---

en donde utilizan imágenes de ojos de distintas personas a color, estas imágenes se convierten a escala de grises y mediante valores de intensidad se segmenta el iris, posteriormente con el iris segmentado en forma circular se transforma a un área cuadrangular y se elimina el ruido del canal azul de la imagen, esta imagen resultante incluye algunas áreas de párpados y pestañas por lo que se procede a eliminarlas, una vez hecho esto, se ecualiza la imagen y se binariza dando como producto final una firma que puede ser comparada con otras almacenadas en una base de datos y poder determinar si pertenece a una persona o no. Dos aplicaciones similares se localizan en [Florian y Carranza 2006] y [Terissi et al., 2006] en donde la única diferencia es el proceso de segmentación ya que en el primero se utiliza una expresión integro diferencial que es una operación que detecta contornos curvilíneos y en el segundo trabajo se aplica un operador Canny junto con transformadas de Hough.

En [Rodríguez et al., 2010] se analiza un software llamado “Los pica piedra sobre ruedas” que es un juego que propicia realizar movimientos oculares a las personas sobre los que se ejecuta. Este proyecto está enfocado a ser utilizado en niños que tienen algún problema con los movimientos oculares ya que las pruebas que se usan comúnmente suelen ser tediosas para ellos. Esta herramienta debe calibrarse para obtener resultados óptimos, se utiliza un monitor situado a 45 cm de distancia entre este y el rostro de los niños, posteriormente se ejecuta el juego y mediante un joystick es controlado, conforme se utiliza el juego se puede observar que es lo que pasa con la mirada de los niños y finalmente se puede diagnosticar si existe o no alguna enfermedad ocular. Este trabajo puede ser utilizado en terapias visuales.

Por último en [Rodríguez, 2003] se analiza la aplicación del filtro de Kalman al seguimiento de objetos y secuencias de imágenes. Este trabajo muestra la posibilidad de rastrear uno o dos objetos así como 2 o 3 personas en movimiento sobre un fondo no controlado. Los resultados son eficientes y dentro de la experimentación se trataron casos en donde existe oclusión de las zonas de interés.

**Tabla 1.1 Análisis histórico de trabajos relacionados.**

Nombre del artículo	País	Institución o universidad	Autores	Fecha	Técnicas	Resultados
Diseño, implementación y validación de un sistema de control para smartphone.	España	Universidad A. Madrid	Tamara Moreno Martín.	Enero de 2013	Luz infrarroja, eyetracking, suavizado.	Aplicación de celular. 78.1 % de efectividad en el reconocimiento de movimientos oculares.
Filtro de partículas en el diseño de un sistema de rastreo preciso de la pupila.	Irán	Universidad Central Islámica Azad	Morteza Sadri, Kaveh Kangarloo y Fardad Farokhi	Agosto de 2012	Filtro de partículas, algoritmo snake. Cámara infrarroja	Base de pruebas conformada por 20 videos a 25 fps, 12 % de efectividad con 10 partículas, 40 % con 100 partículas y 97 % con 500 partículas.
Rastreo del ojo en tiempo real en entornos sin restricciones.	Irán	Universidad Islámica Azad	Majid Tajeri y Mahmoud Mahlouji.	Julio de 2012	Filtro de Kalman, detección de orillas y distancia euclidiana.	Rastreo de personas mediante uso de lentes especiales. Soporta varias posiciones de la cabeza y movimiento del rostro. 91.9 % de efectividad
Identificación de personas mediante imágenes del iris.	España	Universidad de Sevilla	Fernando Liaca Romero, Alberto Morales Calvo y Alejandro Rojas López	2012	Segmentación usando valores de intensidad, eliminación de ruido, cropping, ecualización del histograma, binarización y distancia de Hamming.	Efectividad del reconocimiento alrededor del 85 %.
Extracción digital de características biométricas.	Colombia	Universidad Industrial de Santander	E. F. Díaz Mesa, Y. Torres Moreno y O. J. Tijero Rojas.	2011	Bordes Canny, operaciones morfológicas, cálculo del histograma, transformada de Hough y normalización.	Creación de firma digital única del iris humano.
Evaluación de los movimientos oculares sacádicos mediante un videojuego de entrenamiento de motilidad ocular.	España	Órgano oficial del colegio nacional de ópticos - optometristas de España	Manuel Rodríguez Vallejo, Adela Bernabeu Juárez, Soraya García Pérez y Lucía Leal Pino.	Octubre de 2010	Rendimiento visual, prueba ANOVA y algoritmo de mínimos cuadrados.	Evaluación de los movimientos sacádicos horizontales en 8 puntos aleatorios con la finalidad de mejorar el rendimiento visual.
Tracking automático de objetos en secuencias de imágenes usando filtro de partículas.	España	Universidad de Extremadura	Eva Chaparro Laso	2009	Umbralización, sustracción de fondo y filtro de partículas.	Seguimiento de una y dos pelotas, de un coche un tapón y un ciclista.

Estudio del filtro de partículas aplicado al seguimiento de objetos.	España	Universidad Carlos III Madrid	Alvaro Rodríguez Moya	Octubre de 2009	Filtro de partículas multitracking, histograma múltiple lento.	Rastreo de personas en imágenes con poco ruido, detección de camisetas, pérdida por oclusión. Es un algoritmo bueno pero muy lento.
Implementación de un sistema de identificación de personas en tiempo real por reconocimiento del iris.	Buenos Aires	Universidad de Buenos Aires	Marcelo Luis Mottalli	Octubre de 2008	Binarización, filtro Gaussiano, detección de contornos, normalización y matching.	Segmentación 98 % de efectividad, identificación correcta del iris 97.06 %
Eye Tracking en interacción persona - ordenador.	Granada España	Universidad de Granada	Yusef Hassan Montero y Víctor Herrero Solana	Octubre de 2007	Dispositivos eyetracker y procesos de calibración.	Detección de áreas de interés visual, número total de fijaciones y duración de la mirada sobre un área de interés.
Reconocimiento del iris	Perú	Universidad Nacional de Trujillo	Laura Florian Cruz y Fredy Carranza Atho	2006	Normalización, coordenadas polares, ecuaciones diferenciales, distancia de Hamming y segmentación.	Reconocimiento del iris con tasas altas de precisión, el sistema funciona aún con imágenes en donde aparecen pestañas y partes del párpado.
Sistema de reconocimiento de iris.	Argentina	Universidad Nacional de Rosario	Lucas D. Terissi, Lucas Cipollone y Patricio Balduino	2006	Operador Canny y transformada de Hough, normalización.	Reconocimiento del iris con bajas tasas de error. No hay resultados exactos.
Eye tracking en tiempo real y detección de parpadeo con cámaras USB.	USA	Universidad de Boton	Michael Chau y Margrit Betke	Mayo de 2005	Filtros de umbralización, imágenes binarias, convolución y eliminación de ruido	Detección de ojos y parpadeos. Efectividad del 87.4 %
Aplicación del filtro de Kalman al seguimiento de objetos y secuencia de imágenes.	España	Universidad Rey Juan Carlos	Patricia Rodríguez Muñoz	2003	Filtro Kalman, umbralización, crecimiento de regiones.	Seguimiento de uno y dos objeto sobre fondo negro, sobre fondo no controlado, 2 y 3 personas sobre fondo no controlado, incluyen oclusiones.
Aplicación del filtro de partículas al seguimiento de objetos y secuencia de imágenes.	España	Universidad Rey Juan Carlos	Eva BURGUEÑO RAIGAL	2003	Filtro de partículas, umbralización y sustracción de fondo.	Rastreo de una, dos y tres pelotas, rastreo de una y dos personas y rastreo de un mouse.

---

## Conclusión.

En este capítulo se definieron las bases del proyecto, además se establecieron sus alcances y limitaciones.

El estado del arte está conformado por un total de 15 artículos relacionados a esta tesis de distintos países, en dos idiomas principalmente: español e inglés, siendo el mayor exponente España, algunos países latinoamericanos también han hecho investigación en esta área, Estados Unidos es el más destacado de América. Dentro de los principales objetivos de estos trabajos están: el rastreo de objetos, rastreo de personas, rastreo del iris y de las pupilas, identificación del iris de una persona y análisis de datos extraídos mediante *eye trackers* (publicidad en páginas web e impacto de aplicaciones en computadoras y dispositivos móviles).

Todos los trabajos están diseñados bajo el modelo de un sistema de visión artificial, a continuación se muestran los principales métodos encontrados para cada uno de los pasos de dicha metodología:

- Adquisición de las imágenes: para los trabajos que utilizan imágenes de ojos predomina el uso de iluminación infrarroja para hacer las capturas, en otros casos se optaba por el uso de cámaras convencionales con una buena resolución.
- Pre – procesamiento: el filtro más usado es la conversión a escala de grises, algunos autores utilizan filtros de mejora como aumento de contraste o eliminación de algún canal del modelo RGB.
- Segmentación: este es uno de los pasos en donde se encuentra mayor variedad de filtros aplicados, esto se debe a las características propias de cada trabajo, sin embargo los métodos más utilizados son: umbralización, segmentación por histograma, OTSU y crecimiento de regiones.
- Representación y reconocimiento: para la obtención de características se encuentran métodos como: detección de contornos, obtención de rangos de colores y cálculo del centro de zonas de interés.
- Rastreo: quizá la parte esencial de este trabajo es este paso y los métodos más socorridos son: filtro de partículas, filtro de Kalman y seguimiento dinámico de rasgos.

La visión artificial y específicamente el área de tracking (rastreo) es uno de los temas con más aportación en la actualidad, cada vez es mayor la cantidad de aplicaciones que necesitan de estos procesos y la innovación va de la mano con las necesidades que van surgiendo, por lo que los métodos encontrados en la literatura van modificándose dando lugar a la creación de nuevos algoritmos especializados.

---

## ***CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.***

Este capítulo muestra los temas y conceptos que se utilizan en el desarrollo del proyecto. Esta investigación permite conocer los fundamentos de las técnicas existentes además de las características que ayudan a la elección de un método u otro.

---

## 2.1 Sistema Visual Humano.

El sistema visual humano es el medio más importante con el que una persona cuenta para desenvolverse en el medio que lo rodea, si bien cuenta con otros sensores como el auditivo y el táctil, la vista permite llevar a cabo la mayor cantidad de actividades diarias. Los ojos son los receptores encargados de adquirir la información de todo lo que se encuentra a su alcance, el color de las cosas, el tamaño, la posición, la forma y el movimiento de los objetos.

Los órganos asociados a este sentido son los ojos también llamados globos oculares, estos se encuentran dentro de las cavidades orbitarias.

Dentro del proceso visual se encuentran tres elementos importantes: la luz, los ojos y el cerebro y los pasos que se llevan a cabo para poder “ver” son los siguientes:

- La luz entra a través de la córnea y llega a la pupila en donde esta última tiene la función de regular la cantidad de luz que va a llegar a la retina.
- El encargado de proyectar las imágenes sobre la retina es el cristalino quien además es capaz de enfocar los objetos a diferentes distancias.
- Posteriormente la pupila recibe las imágenes de cabeza y con ayuda de los conos y bastones las convierte en impulsos nerviosos que serán transmitidos al cerebro.
- Por último el cerebro es quien realmente “ve”. Obtiene los impulsos nerviosos, vuelve a girar las imágenes transmitidas y es capaz de interpretar las diferentes características de ellas: color, tamaño, posición, movimiento y forma. Cuando la retina tiene la imagen se encuentra en dos dimensiones pero debido a que se utilizan ambos ojos es posible ver en tres dimensiones gracias a la separación que hay entre ellos.

### 2.1.1 Estructura del sistema visual humano.

En la anatomía del ojo se distinguen los siguientes elementos:

- **Pupila:** abertura por donde llega la luz.
- **Iris:** músculo que controla el tamaño de la pupila.
- **Córnea:** superficie externa, sin vasos sanguíneos, alimentada por el humor acuoso.
- **Nervio óptico:** es un nervio craneal y sensitivo, encargado de transmitir la información visual desde la retina hasta el cerebro.
- **Cristalino:** lente, controlada por músculos. Permite enfocar la información recibida sobre la retina.
- **Retina:** capa donde se recibe, procesa y transmite la información visual.



---

Estos elementos se pueden ver representados gráficamente en la Figura 2.1:

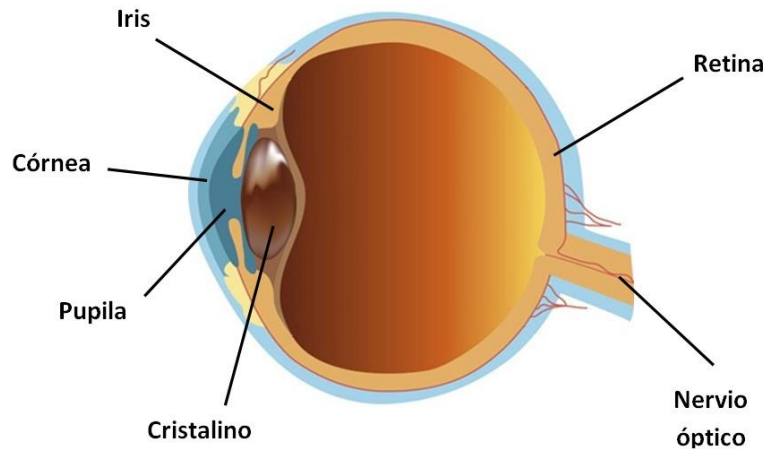


Figura 2.1 Estructura del ojo humano.

### 2.1.2 Movimientos oculares.

Para hacer una clasificación de los distintos movimientos oculares que es posible realizar se pueden utilizar distintos parámetros, por ejemplo el uso de ambos ojos (binoculares) o de uno solo (monoculares), la forma en que se realizan es decir voluntarios o involuntarios, sin embargo el objetivo es poder introducir cualquier tipo de movimiento en alguna categoría es por eso que la más utilizada es la clasificación funcional de Carpenter, puesto que está basada, como su nombre lo dice, en la función que tiene cada movimiento. En base a ese criterio se pueden identificar tres tipos principales de movimientos oculares [Pons, 2004]:

1. Movimientos para el mantenimiento de la mirada: cuando se mueve la cabeza este tipo de movimientos permite que la mirada pueda mantenerse fija sobre algún objeto. Hay dos tipos de movimientos: vestibulo-oculares (compensan los movimientos de la cabeza) y opto cinéticos (compensan los movimientos del objeto).
2. Movimientos para el desplazamiento de la mirada: su función es pasar la atención de un objeto a otro. Fundamentalmente, se dan tres tipos: sacádicos, persecuciones o de seguimiento y vergencias.
3. Movimientos de fijación o micro movimientos: evitan el fenómeno del “fading” (centrar la atención en un punto y dejar de percibir otros objetos) y dentro de esta clasificación están: trémores, micro sacádicos y fluctuaciones.

---

En la Figura 2.2 se observan todos los músculos que intervienen en los movimientos oculares:

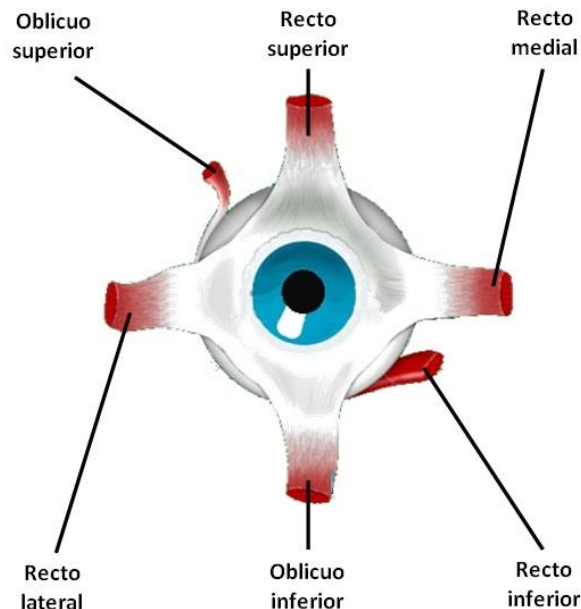


Figura 2.2 Músculos encargados de los movimientos oculares.

### 2.1.2.1 Movimientos para el desplazamiento de la mirada.

Los ojos proporcionan la capacidad de compensar los movimientos del cuerpo para que la mirada mantenga la imagen que se observa de forma estable. Sin embargo es necesario contar con otros mecanismos que ayuden a lograr este objetivo, es por eso que el cerebro realiza de manera voluntaria algunos movimientos oculares que pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Movimientos sacádicos.** La manera de observar las cosas por lo general no es de forma estática, los ojos se mueven de un lado a otro buscando zonas interesantes de lo que se está viendo, de modo que se pueda crear una escena completa de lo que se tiene de frente al individuo. Estos movimientos se producen de forma voluntaria y van acompañados de una fijación que permite obtener la información más importante de lo que se observa, su duración es muy breve aproximadamente entre 20 y 200 milisegundos.
- **Movimientos de persecución o seguimientos.** Este tipo de movimiento se encarga de mantener la atención en objetos que no se encuentran estáticos. No son movimientos rápidos por el contrario solo se enfocan en objetos cuyo movimiento es lento y suave. Inicialmente la mirada iguala la velocidad de movimiento del objeto pero a medida que continúa persiguiéndolo la mirada se retrasa con lo que

---

cada determinado tiempo realiza una nueva captura del objeto que se está siguiendo.

- **Versiones y vergencias.** Estos tipos de movimientos involucran ambos ojos (visión binocular), son desplazamientos de la mirada que involucran tanto movimientos sacádicos como seguimientos lentos. En las versiones hay movimientos sincrónicos y simétricos de los ojos en la misma dirección mientras que en las vergencias el movimiento es simétrico pero en dirección opuesta.

## 2.2 Procesamiento digital de imágenes.

Es un grupo de técnicas que mejoran el aspecto de una imagen o un conjunto de ellas con la finalidad de encontrar más fácilmente detalles o características relevantes que proporcionen información acerca de ellas. Fundamentalmente se pueden encontrar las siguientes cinco etapas dentro de un sistema para procesar imágenes, estas etapas se pueden observar en la Figura 2.3 [González y Woods, 2002]:

- **Adquisición de la imagen.** Esta etapa se refiere a la forma en que se digitaliza una imagen, los dos principales sensores que permiten este proceso son el scanner y las cámaras digitales.
- **Pre procesamiento de la imagen.** Su finalidad es aumentar la calidad de las imágenes para que las etapas posteriores tengan una mayor probabilidad de alcanzar sus propios objetivos.
- **Segmentación.** Esta etapa se encarga de dividir una imagen en imágenes más pequeñas que conforman la original. Al hacer esto se puede enfocar el procesamiento en una zona específica que contenga rasgos más importantes en comparación con el resto de la imagen.
- **Representación.** Consiste en encontrar rasgos con alguna información cuantitativa que sean esenciales para diferenciar una clase de objetos de otra.
- **Reconocimiento.** Es la etapa final y en ella se procede a etiquetar alguna zona que ha cumplido con algunos parámetros es decir es una categorización de los elementos que se han encontrado en la imagen original.

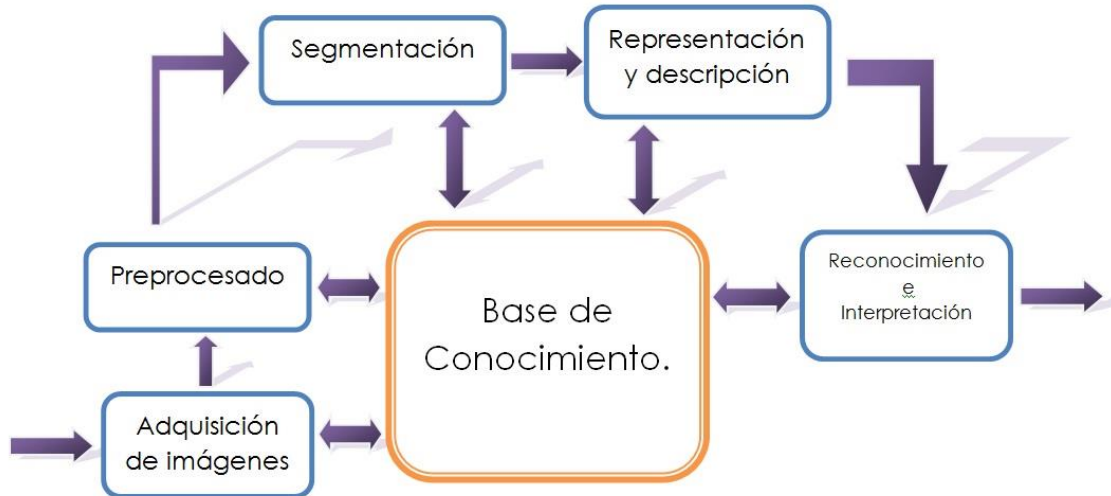


Figura 2.3 Etapas fundamentales del procesamiento digital de imágenes.

### 2.2.1 Adquisición de la imagen.

Para adquirir una imagen digital son necesarios dos elementos, el primero es un dispositivo que permita transformar la intensidad luminosa en una señal eléctrica y el segundo es un digitalizador que convierte la señal eléctrica en un sistema sensible a forma digital. Las cámaras fotográficas, de video y los scanners son los principales dispositivos utilizados para esta tarea. Una imagen está digitalizada cuando para cada región de ella existe un valor que represente el nivel de luminosidad que fue registrado, de esta forma una imagen puede verse plasmada en una matriz de valores de tamaño  $m \times n$  en donde  $m$  y  $n$  dependerá de la resolución con que cuente el dispositivo utilizado por la captura. Un ejemplo de digitalizador se ve en la Figura 2.4



Figura 2.4 Ejemplo de digitalizador de imágenes (scanner).

## 2.2.2 Pre procesamiento de la imagen.

El preprocesamiento de una imagen digital consiste en aplicar filtros que mejoren la calidad de ella, de manera que las características más relevantes sean resaltadas del resto de la imagen, además con esto se reduce la cantidad de información que debe ser procesada e interpretada por la computadora.

Hay cuatro grupos de filtros que por lo general son empleados para mejorar las imágenes, su aplicación depende de la calidad de las imágenes con las que se cuente y son: filtros de suavizado, filtros para eliminar ruido, filtros para realzar bordes y filtros para detectar bordes.

### 2.2.2.1 Conversión a escala de grises.

Uno de los filtros más sencillos y comunes es el paso de una imagen a color en su equivalente en intensidades de gris, además si posteriormente se desea realizar una binarización sobre la imagen es esencial aplicar antes este proceso. Hay varias formas de realizar esta conversión la más común y sencilla es promediar los valores de los tres canales originales de la imagen: rojo, verde y azul, y el resultado será una imagen en escala de grises, otra forma es calculando en cada píxel la intensidad de gris que le corresponde mediante  $f(r, g, b) = 0.6*r + 0.3*g + 0.1*b$ , y asignando dicho valor a las tres componentes. La representación de este proceso se observa en la Figura 2.5. [Toldos, 2009].

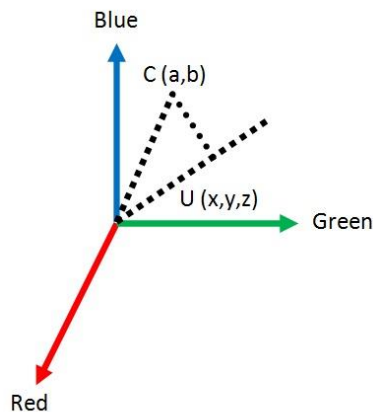


Figura 2.5 Espectro vectorial de colores.

### 2.2.2.2 Binarización por umbral.

Esta técnica consiste en convertir una imagen que se encuentra en escala de grises a otra en donde solo habrá pixeles saturados es decir o blancos o negros. Para ellos se define un umbral que es un valor entre 0 y 255 ya que no hay un nivel de gris que se encuentre

fuera de esos dos límites, después se compara pixel por pixel con este umbral, si la intensidad es mayor al umbral ese pixel se convertirá en blanco, y si fuera menor se convertiría en negro. Con este proceso se pueden identificar todos los objetos contenidos en una imagen sin distinguirse uno de otro pero si del área de trabajo que no es útil. [Toldos, 2009].

### 2.2.2.3 Brillo.

Para cambiar la intensidad del brillo de una imagen únicamente se procede a sumar o restar un valor constante a cada pixel de la imagen, esto se debe de hacer teniendo en cuenta que no se puede salir de los límites permitidos en la escala de grises es decir 0 y 255. Si se observa la figura 2.6 se puede observar que aumentar o disminuir el brillo de una imagen es mover la ordenada al origen de la línea recta con pendiente a 45 grados que representa los grises. [González et al., 2006].

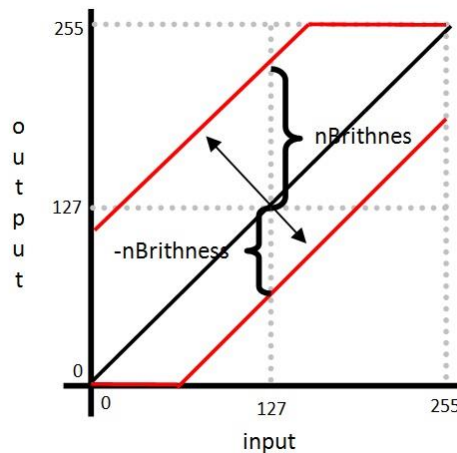


Figura 2.6 Aumento o disminución de brillo.

### 2.2.2.4 Contraste.

Para aumentar o disminuir el contraste de una imagen es necesario mover la pendiente de la línea recta que tiene una inclinación de 45°, esta representa los niveles de gris, al igual que en el aumento o disminución del brillo se debe tener cuidado de no salir de los límites permitidos 0 y 255. En la Figura 2.7 se observa este filtro. [González et al., 2006].

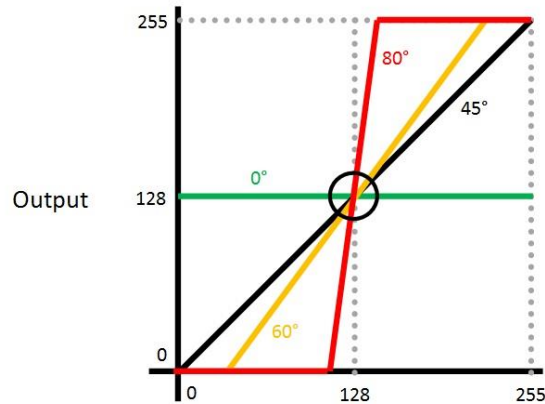


Figura 2.7 Aumento o disminución de contraste.

### 2.2.2.5 Operaciones morfológicas.

Este tipo de procesamiento está basado en la teoría de conjuntos y tiene distintos objetivos, el principal es simplificar las imágenes originales y respetar las características de la forma de los objetos que se encuentran dentro de las imágenes.

#### 2.2.2.5.1 Erosión binaria.

En su definición más simple la erosión de una imagen es la contracción de un objeto, este proceso es muy eficaz para eliminar elementos pequeños en la imagen. Para esta operación se utiliza un elemento estructurante que recorre toda la imagen comprobando si puede estar incluido en los objetos que aparecen dentro de ella, en caso de que esto no pase el resultado es un conjunto vacío. La fórmula de la erosión es:

$$\varepsilon B(X) = X \ominus B = \{x \mid Bx \subseteq X\} \quad (2.1)$$

Dependiendo del elemento estructurante utilizado si algún objeto que se encuentra en la imagen es menor a él, este objeto desaparecerá de la imagen.

Su utilidad consiste en definir una geometría determinada al elemento estructurante y pasarlo sobre la imagen. Al pasar el elemento estructurante sobre la imagen original habrá dos situaciones la primera es que los objetos más pequeños en relación con ese elemento no aparecerán en la imagen resultante, mientras que los demás objetos quedarán degradados en la imagen final. Esto entonces es una degradación de la imagen original y si este proceso se repitiera varias ocasiones todos los objetos de la imagen terminarían por desaparecer. [Platero, 2009].

---

### 2.2.2.5.2 Dilatación binaria.

Este filtro es el opuesto a la erosión, ya que en lugar de contraer un objeto lo expande por lo que una de sus utilidades es rellenar huecos. Este proceso se tiene que llevar a cabo en la imagen completa original, comparando si el elemento estructurante definido está contenido en los objetos que se encuentren. La fórmula de la dilatación es la siguiente:

$$\delta B (X) = X \oplus B = \{x \mid X \cap Bx \neq \emptyset\} \quad (2.2)$$

Con este proceso se representa el crecimiento progresivo de los objetos contenidos en la imagen. Esta expansión puede degradar la imagen original si es iterada, ya que si bien los objetos pueden rellenarse, también los contornos se ven afectados con cada repetición. El hecho de aplicar los filtros de erosión y dilatación en una misma imagen no quiere decir necesariamente que la imagen puede ser reconstruida, por el contrario, cada vez que se aplica uno de estos procesos el resultado es diferente a tal grado que puede no recuperarse la imagen original [Platero, 2009].

## 2.3 Segmentación de una imagen.

Es la tercera etapa de un sistema de procesamiento digital de imágenes. Se realiza cuando previamente se ha mejorado la imagen original y es más fácil encontrar las zonas que tengan las características más relevantes para un caso particular. La segmentación tiene como objetivo dividir la imagen original en las partes que la constituyen, esta subdivisión depende del objetivo particular que se esté tratando de alcanzar.

Normalmente la clasificación más básica consiste en separar objetos del fondo de la imagen. Se pueden hacer otras segmentaciones más complejas para crear varias clases de objetos contenidas en una misma imagen, por lo que es necesario tener uno o varios elementos relevantes que permitan hacer esa división.

Este proceso se puede automatizar, sin embargo es una de las labores más difíciles de llevar a cabo. Raramente la segmentación por si sola es capaz de llevar a la solución del problema, sin embargo de esta etapa puede depender el éxito o fracaso del sistema de procesamiento digital de imágenes, de ahí radica la importancia de tener una buena segmentación. En ocasiones se puede optar desde un principio por mejores dispositivos de captura que permitan que el proceso de segmentación se lleve a cabo de manera más sencilla dando un resultado más robusto.

Por tanto la segmentación se puede llevar a cabo en base a alguna de las siguientes propiedades:

- Discontinuidad. Permite detectar líneas, aristas o bordes.



- 
- Similaridad. Construye regiones dadas por división, fusión, crecimiento de regiones o umbralización.
  - Conectividad. Define un objeto mediante una secuencia de píxeles que son adyacentes entre sí.

Las técnicas de segmentación a su vez pueden ser agrupadas en cuatro grupos que son:

- Métodos basados en píxeles. Locales y globales.
- Métodos basados en bordes.
- Métodos basados en regiones. Crecimiento, fusión y división.
- Métodos basados en modelos.

### **2.3.1 Técnicas de segmentación.**

#### **2.3.1.1 Métodos basados en el histograma.**

La segmentación basada en el histograma se hace calculando precisamente el histograma a partir de todos los píxeles que conforman a la imagen, de esta forma se crea una gráfica en donde aparecen picos y valles, estas dos características se utilizan para ubicar grupos de píxeles en la imagen. Si se tuviera una imagen en dos tonos únicamente, en el histograma aparecería un valle muy marcado que podría diferenciar las dos regiones de la imagen original, por lo que los valles son los que definen la segmentación. Esta técnica tiene la ventaja de que solo se analizan una única ocasión los píxeles que contiene la imagen sin embargo su principal desventaja es que si la imagen que se está procesando es muy compleja, en el histograma será difícil identificar que valle es el más importante y por lo tanto más adecuado utilizar para segmentar [Toldos, 2009].

#### **2.3.1.2 Detección de bordes.**

Detectar bordes puede ser un método para segmentar objetos. Básicamente se trata de encontrar el contorno de las regiones que aparecen en una imagen. Este proceso se logra encontrando píxeles que tiene características similares de dirección además del módulo de gradiente. Dos píxeles se consideran de una misma frontera si presentan alguna condición de conectividad además de que la diferencia entre sus gradientes no es mayor a la de un umbral determinado. Este tipo de segmentación puede requerir en la mayoría de veces de filtros que eliminen ruido ya que de no ser así el resultado serán contornos que no se cierran a la perfección y ese es el objetivo [Martín, 2002].

#### **2.3.1.3 Métodos de crecimiento de regiones.**

El método de crecimiento de regiones utiliza píxeles “semilla” para encontrar las distintas regiones que conforman una imagen. Cada semilla es una entrada para empezar a crecer una región, se debe considerar una regla de similitud y a partir de ella empieza el crecimiento, identificando todos los vecinos de la semilla. La región crece siempre que la

---

regla de similitud se cumpla, en caso contrario se puede decir que se está junto a otra región diferente, este proceso debe realizarse por toda la imagen o hasta que todos los vecinos de la región creciente no cumplieron con la regla de similitud. Este método puede encontrar tantas regiones como pixeles semilla se definan.

Esta técnica presente dos interrogantes: ¿qué criterio de similitud se debe utilizar? y ¿dónde deben estar los pixeles semilla?, para responder a la primer pregunta se puede utilizar factores como: el color, la luminancia o la textura y para la segunda interrogante hay también varios factores que pueden determinar estos valores, como utilizar un rango de intensidades que sea el más concurrente en la imagen, además es posible definir las semillas de forma automática. Para estos dos problemas la mejor solución siempre dependerá de las características de las imágenes que se estén procesando y los objetivos particulares [Martín, 2002].

El crecimiento de regiones con semillas automáticas es un algoritmo modificado que no requiere semillas explícitas. Empieza con una región única  $A_1$  - el píxel elegido aquí no influyen significativamente en la segmentación final. Por cada repetición se considera los píxeles vecinos de la misma forma que en el anterior algoritmo. La diferencia con el algoritmo de crecimiento de regiones normal a partir semillas en que si el mínimo  $\delta$  es menor que un umbral predefinido  $T$  entonces se agrega a la región respectiva  $A_j$ . Si no, entonces el píxel se considera significativamente diferente de todas las actuales regiones  $A_i$  y se crea una nueva región  $A_{n+1}$  con ese píxel.

Otra forma de este algoritmo, propuesta por [Shapiro, 1985], se basa en la intensidad de píxel. La media y la dispersión de una región y la intensidad del píxel candidato se utiliza para calcular un test estadístico. Si la prueba estadística es suficientemente pequeña, el píxel se añade a la región, y la media de la región y de dispersión se vuelve a calcular. De lo contrario, el píxel es rechazado, y se utiliza para formar una nueva región.

En la Figura 2.8 se observa el proceso de crecimiento de regiones.

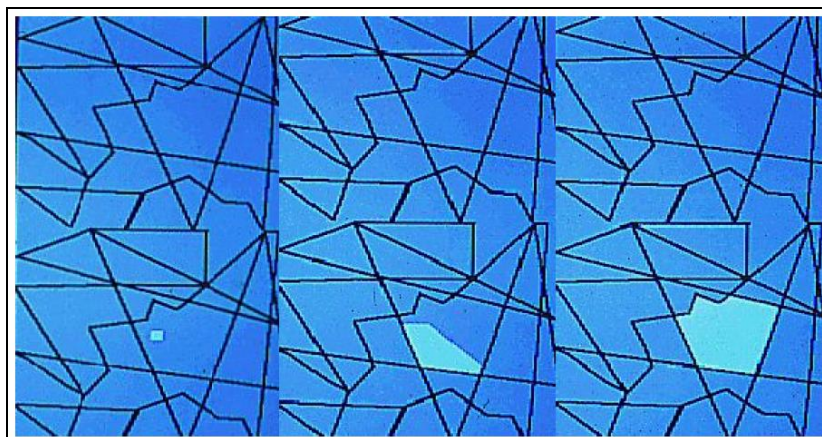


Figura 2.8 Ejemplo de crecimiento de regiones.

---

#### **2.3.1.4 Método del valor umbral (umbralización).**

La umbralización es similar al proceso de binarización, puesto que se define un valor para separar los objetos que estén por encima de él y los que estén por debajo. También está la posibilidad de definir varios umbrales y de esta forma se pueden segmentar muchos objetos según en el grupo que caiga cada uno de ellos de esta forma se tienen dos caminos para aplicar la umbralización:

1. Umbral único. Prácticamente es una binarización. Se define un umbral para separar los objetos del fondo. Dado un umbral  $T$  todos los píxeles que estén por encima de él serán una región y los que estén por debajo de él formarán la segunda región.
2. Umbral multinivel. Al tener una imagen con muchos objetos para separarlos todos hacen falta  $x-1$  umbrales de forma que los píxeles que se encuentre entre cada par de umbrales  $T_i$  y  $T_j$  representarán a un objeto.

Los umbrales para ambos tipos pueden variar dado que las imágenes que se analizan siempre tiene características distintas deben adaptarse a ellas [Martínez, 2005].

#### **2.4 Representación y descripción.**

Posterior a la segmentación y dado que gracias a esa etapa se tiene como resultado una imagen en donde sus partes están categorizadas, se puede proceder a representar y describir esa nueva imagen. Para hacer esto se puede tomar una de las siguientes dos posibilidades:

1. Hacerlo en términos de sus características externas (su contorno).
2. Hacerlo en base a sus características internas (los píxeles que comprenden la región).

La elección del método de representación es solamente una parte de la tarea a realizar, el paso siguiente consiste en describir la zona con la representación elegida.

La elección de la representación así como muchos de los procesos que se realizan depende de lo que se está buscando, una representación externa se realiza cuando lo más importante son las características de forma y una interna cuando es más relevante el color o la textura es decir las propiedades de reflectividad. Cualesquiera que sean esas características debe de considerarse los posibles cambios de tamaño, traslación y rotación de las imágenes, es decir implementar la sensibilidad [Rojas, 2006].

---

## 2.5 Reconocimiento e interpretación de una imagen.

Es la etapa final del sistema de visión artificial y consiste en darle un significado a la imagen final, anteriormente se ha logrado identificar las partes que componen a la imagen original, sus características principales por lo que solo resta saber qué es lo que representa esa imagen. Un ejemplo de este reconocimiento e interpretación es el que se da en los scanners que son capaces de transformar una página de revista en un documento modificable, es decir, estos dispositivos cuentan con un software que reconoce caracteres alfanuméricos en alguna imagen que es escaneada y transfiere estos datos a una hoja de procesador de textos. El objetivo hasta ahora es hacer este proceso tal cual lo realiza un ser humano sin embargo aún no se ha alcanzado en su totalidad esta meta.

Los métodos para realizar esta etapa son diferentes según la aplicación que se desee, para el reconocimiento es común utilizar bases de datos relacionadas al proyecto y alguna de las siguientes técnicas:

- Redes neuronales artificiales.
- Lógica difusa.
- Clasificadores estadísticos óptimos.
- Correspondencia por correlación.
- Clasificador de distancias.
- Reconocimiento estructural.

Por la parte de la interpretación de la imagen, consiste en definir los elementos que se han reconocido en ella. Actualmente las técnicas más utilizadas para este propósito están basadas en sistemas expertos.

## 2.6 Procesamiento digital de video.

Un video es una secuencia de imágenes que crean la ilusión de ser una animación esto se debe a la velocidad con que son presentadas, el ojo humano deja de notar el cambio de imagen cuando en un segundo el número de imágenes es mayor a veinte.

Un video se logra capturar con cámaras digitales o analógicas, la televisión es el mayor ejemplo del video análogo ya que su flujo es continuo y generalmente se plasma en cintas que pueden ser borradas múltiples veces mientras que el video digital está conformado por imágenes digitales que pueden ser comprendidas por un ordenador ya que están formadas en su más bajo nivel por unos y ceros.

---

El procesamiento digital de video consiste en trabajar sobre los cuadros que lo conforman, si bien en muchas ocasiones un video viene acompañado de una banda sonora, trabajar con ella sería otro tema muy diferente, por lo que este tema se limita a lo relacionado exclusivamente con la parte visual. Como ya se ha hecho mención un video es una secuencia de imágenes y cada una de ellas puede ser procesada por sí sola con las técnicas de procesamiento digital de imágenes.

De la misma manera que en el procesamiento de imágenes se obtiene una imagen final, en este caso se puede obtener un video final procesado, en el que se resalten características importantes para lo que se desee realizar [Salavert, 2011].

### **2.6.1 Video analógico.**

El primer tipo de video que apareció fue el video analógico que es mejor conocido por las cintas VHS, estas cintas estaban protegidas por una carcasa plástica, sin embargo este medio de almacenamiento no era confiable puesto que con el uso se deterioraba cada vez más, además, estas cintas podían ser reutilizadas borrando el contenido que tenían previamente.

El funcionamiento de estas cintas era básicamente la conversión de los cambios de intensidad de luz en una señal eléctrica variable, que se plasmaba en la cinta puesto que era un material fotosensible.

Al final de la grabación analógica la información que se tenía era de dos tipos:

- Nivel de luz en cada punto de la imagen.
- Tonos de color en cada punto de la imagen.

Este tipo de grabaciones hacían que el procesado (en caso de que se decidiera hacer) fuera una tarea mucho muy difícil, puesto que la grabación era inseparable ya que la cinta se tenía físicamente en una sola pieza, de modo que si se deseaba por ejemplo corregir una parte del video tenía que aplicarse la corrección a la cinta completa, otro problema grave era cuando se deseaba borrar solo una parte del video por ejemplo entre el fotograma 1000 y el 2000 entonces se tenía que cortar la cinta exactamente en esos dos puntos y volverla a unir, lo que sin duda le restaba mucha funcionalidad además de calidad al video.

Otros de los factores que se ven afectados son la calidad de color, el brillo y el contraste del video ya que no se podía corregir como en el caso de los dispositivos digitales actuales en los que se pueden definir esos parámetros antes de comenzar a grabar, sin olvidar que para conseguir un video analógico de buena calidad se necesitaba contar con un equipo nuevo y muy costoso tanto del dispositivo de grabación como de la cinta utilizada.

---

Sin duda este medio de grabación tiene muchas desventajas respecto a los dispositivos digitales hablando en materia del procesamiento de video.

### **2.6.2 Video digital.**

La principal diferencia que marcó la aparición de este tipo de video es la omisión total de las cintas magnéticas en las que quedaban plasmadas las secuencias de imágenes, en esta tecnología se utilizan soportes digitales como discos duros para almacenar la información, la cual queda grabada en un formato computacional de unos y ceros que facilitan su procesamiento en ordenador.

Al igual que en las cámaras fotográficas la calidad depende del tipo de lente que se utilice ya que mientras más pixelaje tenga mayor será el tamaño de la matriz de píxeles correspondiente a cada uno de los cuadros que conforma el video. Por lo tanto el tamaño del vídeo se expresará de la siguiente manera 320 x 240 píxeles, esto significa que las dimensiones del vídeo son 320 píxeles de ancho y 240 píxeles de alto.

El segundo aspecto que influye en la calidad de la imagen que se obtiene es el *Bitrate* o flujo de datos, dicho en otras palabras es la cantidad de información que pasa por segundo, mientras mayor sea este factor la calidad se eleva.

En los sistemas de video digital es posible llevar a cabo un procesamiento de los videos mucho más fácil en comparación con los videos analógicos. Primero su forma de almacenamiento es en el lenguaje de computador, unos y ceros, no es necesario hacer ninguna otra cosa para poder introducirlo a nuestra computadora, únicamente tener el canal para hacerlo mientras que en el video analógico habría que convertirlo en una señal digital. Otro de las ventajas es que al no ser un medio de almacenamiento físico es posible realizar cortes en las secuencias de imágenes, extraer exactamente un fotograma deseado, copiar partes del video para crear otros nuevos, en fin la cantidad de operaciones que se pueden realizar sobre los videos digitales es mucho mayor que la permitida por las características de los videos analógicos.

### **2.6.3 Tracking.**

El *tracking* o rastreo por su traducción al español, consiste en encontrar una zona de interés en un cuadro extraído de una secuencia de video para posteriormente encontrarlo en los cuadros sucesivos.

Previamente se deben llevar a cabo varios filtros que reconozcan el objeto que se desea seguir ya que se necesitan saber algunas características que hagan posible encontrarlo en cuadros posteriores, por ejemplo, el color, la forma y la posición.

### 2.6.3.1 Punto de Tracking.

El punto de tracking se refiere a la zona que será objeto del rastreo. Su elección se realiza previamente con un sistema de procesamiento de imágenes que identifica algún objeto específico, después se define una zona de búsqueda que es limitar el área en donde se va a buscar el objeto deseado puesto que ya se conoce una posición previamente, esto se hace para no tener que buscar en toda la imagen completa. En la Figura 2.9 se observa un ejemplo de una imagen en la que se define la zona de interés también llamado patrón y la zona de búsqueda [López, 2005].

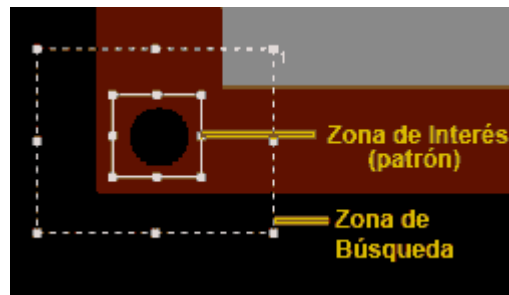


Figura 2.9 Punto de tracking.

### 2.6.3.2 Técnicas de tracking.

#### 2.6.3.2.1 Seguimiento basado en rasgos (características).

Este tipo de rastreo tiene como principal característica la disminución de la complejidad funcional cuando los rasgos que se van a seguir son muy sobresalientes es decir muy notorios del resto de la imagen, esto se hace en lugar de rastrear por ejemplo los contornos. Lo que se realiza es un *matching* o un emparejamiento entre un cuadro y su sucesor, una vez que se conoce una característica relevante del objeto a seguir, esta se busca cerca del área donde se encontró previamente. Se deben utilizar rasgos como el color, la intensidad y la textura.

En este tipo de seguimiento existen dos vertientes:

- Seguimiento dinámico de rasgos.
- Seguimiento estático de rasgos.

Es estático cuando los rasgos se extraen posteriormente en cada frame y el algoritmo calcula la correspondencia óptima entre ellos. Mientras que en el seguimiento dinámico se extraen los rasgos cuadro a cuadro rastreándolos en frames consecutivos. [Yáñez, 2010].

---

Estos algoritmos suelen subdividirse a su vez en tres categorías de acuerdo a la naturaleza de los rasgos que se seleccionan: algoritmos basados en rasgos globales, basados en rasgos locales, y basados en la dependencia gráfica [Izquierdo, 2009].

1. Los rasgos que se utilizan en el algoritmo basado en rasgos globales incluyen centroides, perímetros, áreas, algunos órdenes de cuadraturas y colores.
2. Los rasgos utilizados en el algoritmo basado en rasgos locales incluyen segmentos de línea, de curvas y vértices de las esquinas.
3. Los rasgos utilizados en los algoritmos basados en la dependencia gráfica incluyen una variedad de distancias y relaciones geométricas entre ellos.

#### **2.6.3.2.2 Algoritmos de seguimiento basado en filtros de predicción.**

Estos algoritmos utilizan información conseguida en instantes anteriores para predecir hacia donde se mueve la región de interés. La información utilizada puede ser la posición, la dirección, el color y conforme más información previa existe es más fácil calcular el movimiento para cuadros posteriores. Dentro de esta categoría se encuentran dos filtros importantes: el filtro de Kalman y el filtro de partículas [Yáñez, 2010].

##### **2.6.3.2.2.1 Filtro Kalman.**

Tiene como base ecuaciones matemáticas que proporcionan una solución óptima de forma recursiva. Este filtro utiliza información previa para calcular un estimador de un sistema  $t$  basándose en los datos previos es decir  $t-1$ , con esto puede actualizar estos datos para cada cuadro posterior. Ver Figura 2.10 para el ciclo del filtro de Kalman [Yáñez, 2010].

Gracias a que utiliza información previa y cada vez la información es mayor se dice que la solución es óptima puesto que el margen de error se reduce estadísticamente. Este algoritmo calcula una solución nueva por cada cuadro procesado o cuando nueva información se incorpora al sistema, de modo que la probabilidad de caer en un error es mínima ya que el filtro es adaptable.

De esta forma el filtro de Kalman tiene dos pasos importantes: la actualización del tiempo es decir moverse de un cuadro a otro sin interrupción hasta que la secuencia de imágenes termine y la actualización de la observación o corrección que se refiere a encontrar en el instante de tiempo en que se encuentre la región de interés.



---

Una de las características que hacen a este filtro atractivo es su habilidad para predecir el estado de un sistema tanto en el pasado, en el presente y hacia el futuro. Este tipo de procesamiento por lo tanto utiliza procesos estocásticos y debe involucrar un grado de incertidumbre.

Para el rastreo de objetos o personas el filtro de Kalman trata de encontrar una característica relevante como un punto, un borde, una esquina o una región dentro de una zona de búsqueda en el siguiente cuadro de la secuencia en una zona alrededor de la posición que es predicha, por lo que se espera encontrar el objeto en un grado de confianza.

El proceso a ser estimado por el filtro de Kalman tiene como objetivo resolver el problema de estimar el estado  $X \in R^n$  de un proceso controlado en tiempo discreto, el cual es dominado por una ecuación lineal en diferencia estocástica de la siguiente forma [Yañez, 2010]:

$$X_t = AX_{t-1} + wt_{-1} \quad (2.3)$$

Donde:

$X_t$ : estado en el momento  $t$ .

$A$ : matriz de dimensión  $m \times n$  que relaciona el estado en el periodo previo con el estado en el momento  $t$ .

$X_{t-1}$ : estado en el momento  $t-1$ .

$w_{t-1}$ : error del proceso en el momento  $t-1$ .

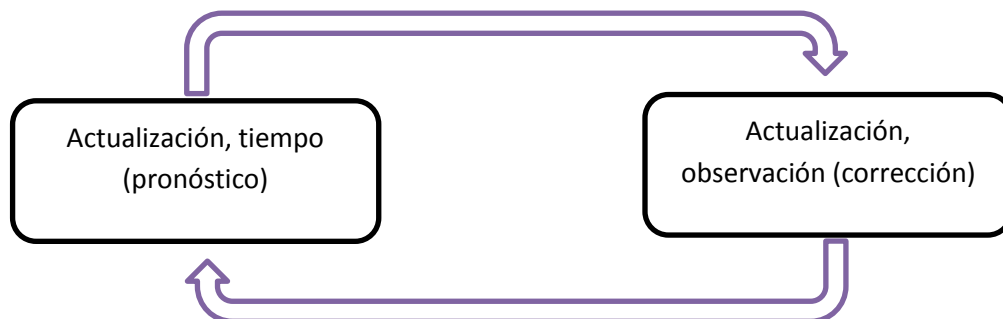


Figura 2.10 Ciclo del algoritmo de Kalman.

Existe otra versión del filtro llamada Filtro de Kalman extendido que se utiliza cuando los sistemas no son lineales.

---

### 2.6.3.2.2 Filtro de partículas.

El filtro de partículas tiene como base el método de Monte Carlo fue diseñado en 1993 por N. Gordon, D. Salmond y A. Smith [Rodríguez, 2009]. Algunos lo llaman también SIS (*Sequential Importance Sampling*) o algoritmo *Condensation*.

Su funcionamiento es gracias a un conjunto de muestras llamadas partículas y a un peso asignado a cada una de ellas. Cada partículas es una posible posición en el espacio y cualquiera puede ser mejor en determinado momento, este valor de importancia está dado por el peso que se calcula con una función de probabilidad tomando en cuenta la información previa de cada partícula.

Este filtro funciona en cuatro etapas que son:

- Inicialización. En esta etapa se generan un número  $n$  de partículas al azar sobre la imagen, en realidad son un conjunto de puntos en donde cada uno de ellos posee un conjunto de coordenadas. La creación de las partículas puede ser aleatoriamente o se puede utilizar información previa para generarlas.
- Actualización. Cada partícula debe recibir un peso según algún parámetro definido este suele ser llamado estado de referencia y puede ser la distancia euclidiana entre pixeles, la distancia entre colores o la similitud.
- Estimación. Con estas parejas de valores (partículas y pesos) se puede crear un nuevo conjunto de partículas y comúnmente se utilizan métodos de re muestreo probabilísticos, con estos métodos se garantiza que las partículas con mayor peso tengan una mayor probabilidad de ser elegidas para el instante siguiente.
- Predicción. Después de haberse creado el nuevo conjunto de partículas, se agrega un poco de ruido para dotar al sistema de un poco de variabilidad.

En concreto, el Filtro de Partículas representa la densidad a posteriori mediante un conjunto discreto de  $N$  partículas  $(x_1, \dots, x_N)$  y sus probabilidades asociadas  $(\pi_1, \dots, \pi_N)$ . (Burgueño, 2003).

Una partícula se define como una dupla formada por un estado  $x$  y un peso  $\pi$  (Hernández, 2010):

$$p = f(x; \_) \times \pi \quad (2.4)$$

En la Figura 2.11 se encuentra el diagrama de bloques para el filtro de partículas.

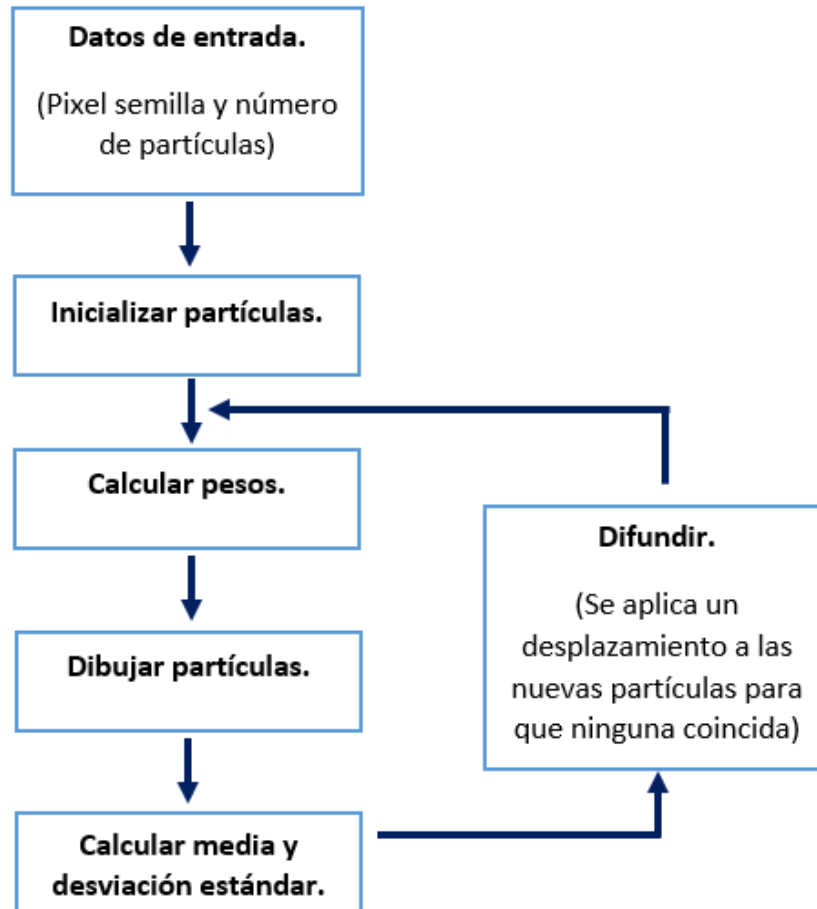


Figura 2.11 Diagrama de bloques del filtro de partículas.

### Conclusiones:

El proyecto está fundamentado en los principios de visión artificial y algunas de sus técnicas como segmentación, morfología y rastreo además se realizó una investigación sobre los tipos de trastornos oculares. Esta información permite hacer una elección adecuada de los procesos que serán aplicados.

Para cada uno de los objetivos específicos del proyecto se eligieron técnicas concretas: para la segmentación se seleccionó la umbralización y el crecimiento de regiones, para la morfología se adaptaron los filtros de erosión y dilatación y para el rastreo se tomó el filtro de partículas y el seguimiento dinámico de rasgos. Esta documentación permite aplicar de forma eficiente los algoritmos seleccionados.

---

## ***CAPITULO 3: METODOLOGÍA.***

En este capítulo se detallada la metodología que se utilizó para el desarrollo del proyecto. Cada fase se explica de forma independiente y se muestra un ejemplo que hace más claro el proceso.

### 3.1 Metodología general.

El proyecto tiene como objetivo específico hacer un análisis y una comparación de dos diferentes métodos de rastreo de las pupilas, esto genera una metodología en la que se encuentran operaciones iguales hasta el paso del rastreo ya que para cada uno de ellos se realizan procesos diferentes. Las etapas que se encuentran en la metodología se observan en la Figura 3.1:

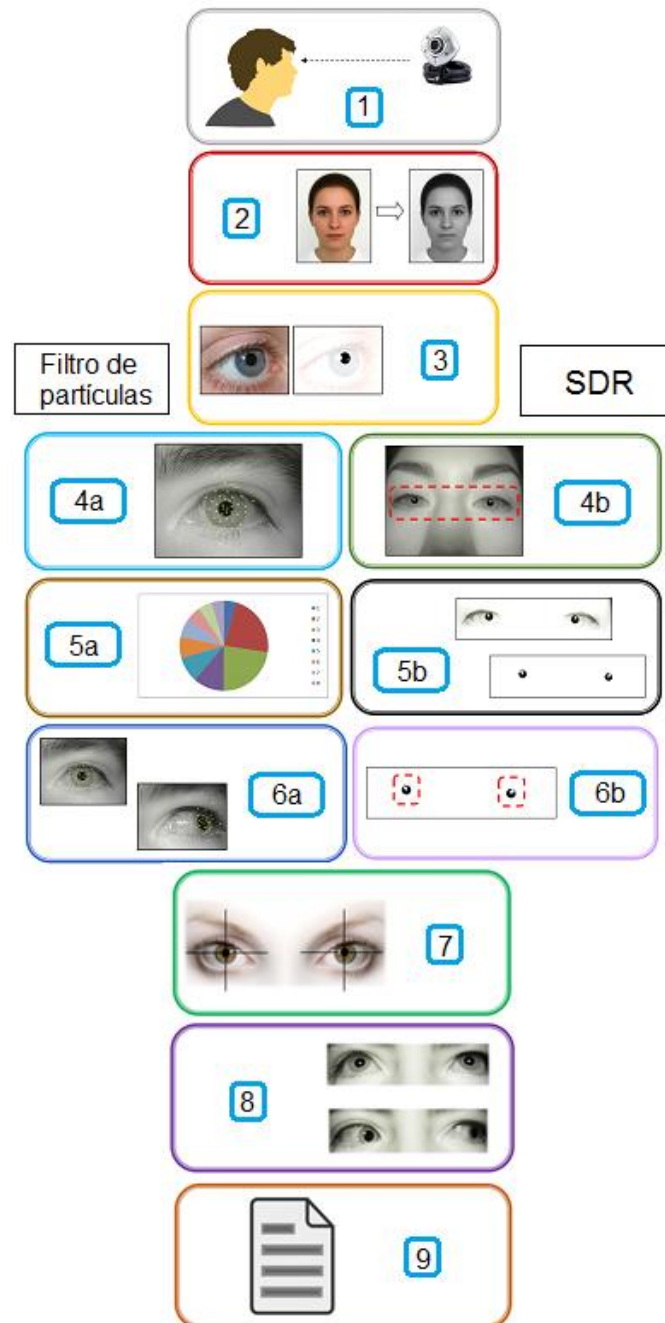


Figura 3.1 Diagrama del sistema propuesto.

---

En la metodología propuesta para el desarrollo de los dos filtros de rastreo, los tres primeros pasos se repiten para ambos (1 obtención de las secuencias de imágenes, 2 conversión de los cuadros a escala de grises y 3 segmentación de las pupilas), así como los tres últimos (7 determinación de la posición de las pupilas en coordenadas, 8 registro de los movimientos oculares y 9 generación de archivo de texto con los datos relevantes), sin embargo los pasos intermedios son diferentes para cada filtro; para el caso del filtro de partículas se tiene: 4a generación aleatoria de partículas, 5a cálculo del peso de cada partícula y 6a generación de nuevas partículas en base a su peso, por otra parte para el SDR se tiene: 4b determinación de la zona de búsqueda, 5b eliminación de distractores y 6b rastreo del patrón o zona de interés.

### **3.2 Obtención de las imágenes.**

El primer paso de la metodología es contar físicamente con el prototipo que permita obtener los videos de los movimientos de los ojos de los pacientes. Es importante que este sistema de cómo resultado secuencias de imágenes con características adecuadas para las pruebas que posteriormente se llevan a cabo. Para determinar que dispositivo de captura tiene mejor desempeño se realizaron distintas tomas con las siguientes cámaras:

1. Cámara de celular.
  - Sony Ericsson.
  - 5 Megapíxeles.
2. Webcam de laptop.
  - Dell.
  - 2 Megapíxeles.
3. Webcam externa.
  - Acteck.
  - 2 Megapíxeles.
4. Webcam con un filtro infrarrojo casero.
  - Acteck.
  - 2 Megapíxeles.
5. Webcam infrarroja.
  - Genius.
  - 1.3 Megapíxeles.

Las capturas resultantes se muestran a continuación en la Figura 3.2:



Figura 3.2 Tomas de distintas cámaras. Cámara de celular (arriba izquierda), webcam de laptop (arriba derecha), webcam externa (abajo izquierda) y webcam con filtro infrarrojo casero (abajo derecha).

Como se puede observar la calidad de las cuatro fotografías no es óptima, el procesamiento necesario para alcanzar los objetivos se incrementa al no contar con imágenes de buena calidad. La opción más viable es utilizar una cámara e iluminación infrarroja ya que con este tipo de dispositivos las capturas proporcionan mayor cantidad de información relevante para el procesamiento. A continuación se muestra una captura de la cámara infrarroja apoyándose con una lámpara de iluminación de la misma tecnología (Figura 3.3):

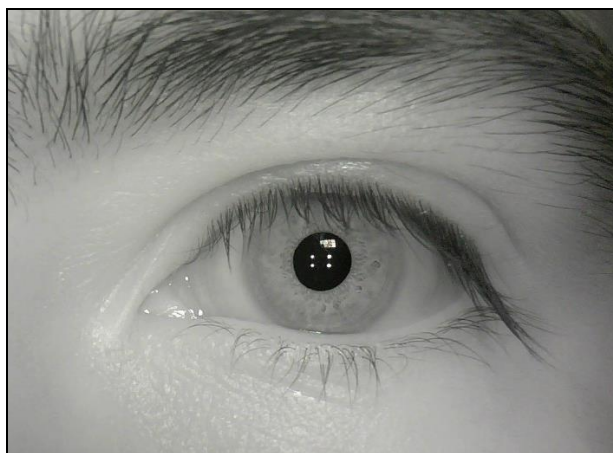


Figura 3.3 Captura utilizando iluminación infrarroja y cámara infrarroja.

---

Las características de la cámara y de la lámpara utilizadas son las siguientes:

Cámara:

- Marca: Genius.
- Cámara con filtro infrarrojo.
- Resolución: 1.3 Megapíxeles.
- Formato de video: MP4, JPEG y WMV.
- Velocidad: hasta 30 Fotogramas/segundo.
- Tamaño de fotograma: hasta 1280\*1024 pixeles.
- Conexión: USB.
- Modelo: eface 1325r.

Lámpara:

- Marca: Steren.
- Lámpara CCTV con 77 leds infrarrojos.
- Luz IR alcanza 30 m. de longitud

Los dispositivos se muestran en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Webcam y lámpara infrarrojas utilizadas.

Un requerimiento más para la toma de los videos es que los rostros de las personas no deben de moverse, es decir, únicamente se deben registrar los movimientos oculares en los videos. Por otra parte se debe de contar con la proyección de una animación controlada en cuanto a velocidad y tipos de movimientos, de modo que todas las pruebas se lleven a cabo bajo las condiciones que requiera cada persona. Por lo tanto el prototipo físico está constituido como se muestra en la Figura 3.5:



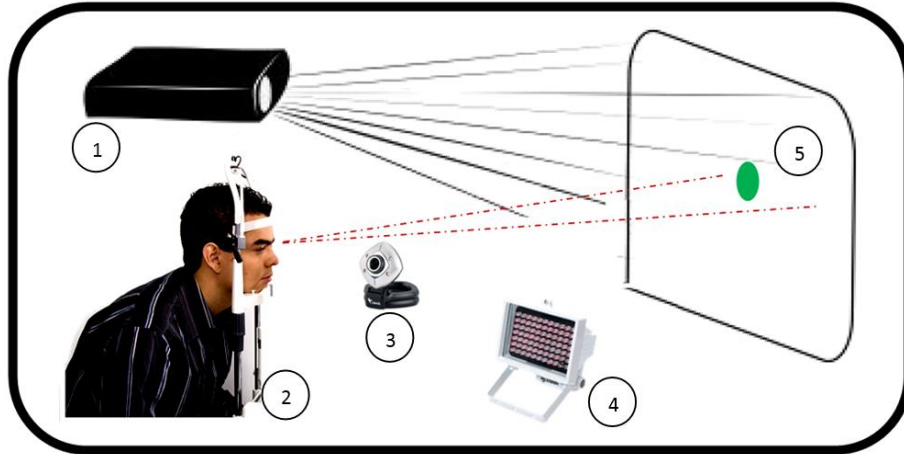


Figura 3.5 Diagrama del prototipo físico.

En donde:

1. Proyector que reproduce la animación controlada.
2. Base del mentón para evitar los movimientos del rostro.
3. Webcam infrarroja.
4. Iluminación infrarroja.
5. Animación reflejada en una superficie frente a la persona.

Con estos elementos todos los videos tendrán las mismas características que facilitarán su posterior procesamiento.

### 3.3 Conversión a escala de grises.

El segundo paso dentro de la metodología clásica del procesamiento digital de imágenes es la mejora de las mismas, y esto se logra aplicando diferentes filtros dependiendo del objetivo final y los requerimientos finales de la aplicación.

Contar con los dispositivos infrarrojos reduce en gran cantidad el número de filtros necesarios para procesar los cuadros del video, esto es respecto a las tomas que ofrecen las otras cámaras en donde serían necesarios varios filtros para poder obtener imágenes de una calidad aceptable. Solo se aplica un único filtro sobre todos los cuadros del video y es el que pasa las imágenes originales a su equivalente en escala de grises, ya que aunque no lo parezca las imágenes infrarrojas están tomadas bajo el modelo RGB y esto haría más pesado el trabajo con cada imagen. El cambio de una imagen a color a escala de grises, es un proceso sencillo que se obtiene promediando los valores RGB de la imagen original, es decir, sumando el valor de rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*) de cada pixel y

---

dividiéndolo entre 3. Cuando se hace este procedimiento se generan imágenes formadas por intensidades de gris que van desde el negro (0) hasta el blanco (255) y por lo tanto no habrá más allá de esos dos límites, con esto el procesamiento se vuelve más sencillo que al trabajar con imágenes en color.

En la siguiente imagen (Figura 3.6) se observa el pase a escala de grises de una imagen en color:



Figura 3.6 Imagen original y su equivalente en escala de grises.

### **3.4 Segmentación.**

La segmentación de la pupila es una de las partes más importantes del sistema ya que de ahí se parte para la implementación del rastreo.

Debido a que son dos los algoritmos de rastreo los que se implementaron, la segmentación también se aplicó de dos maneras distintas ajustándose a los filtros.

Para el método de filtro de partículas se utilizó la técnica de crecimiento de regiones [Hager, 2007], en ella se encuentran las zonas de interés mediante pixeles semilla que pertenecen a dichas zonas y a partir de ellas se pueden diferenciar del resto del área de las imágenes. En el segundo caso se utilizó el método de umbralización por Otsu [Otsu, 1979], ya que previamente se aplica una binarización de la imagen y gracias a las características obtenidas por la toma infrarroja es posible utilizar ese método para separar las pupilas del fondo de la imagen.

Cabe aclarar que el proceso de segmentación en el filtro de partículas únicamente se realiza en la primer imagen de todo el conjunto, y se hace con la finalidad de encontrar alguna característica de la región que se desea rastrear para que durante toda la duración de la aplicación no se pierda la atención en la pupila que es el área de interés. En este caso la característica que se puede utilizar para el resto del programa es la tonalidad del pixel semilla, es decir, el color de la región que es posible diferenciar del resto de la imagen.

---

En la siguiente Figura 3.7 se observa el resultado de la segmentación por ambos métodos:

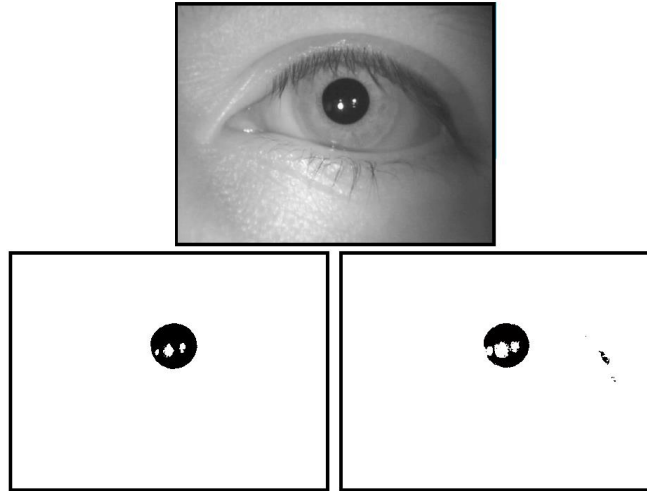


Figura 3.7 Imagen original (arriba), imagen segmentada por crecimiento de regiones (abajo izquierda) e imagen segmentada por método de umbralización (abajo derecha).

### 3.5 Tracking del iris.

El rastreo del iris se lleva a cabo cuando los tres primeros pasos han alcanzado su objetivo. Esta es la última técnica de visión artificial que se debe aplicar y como su nombre lo indica se trata de rastrear algún objeto que se encuentre dentro del video durante toda la duración del mismo, con la finalidad de poder conocer la ubicación de esa región de interés en uno o varios momentos específicos del video.

Existen varios métodos para llevar a cabo este rastreo, en este proyecto se utilizaron dos para poder hacer una comparación y un juicio de ambos y poder determinar cuál es mejor para alcanzar los objetivos finales.

Los métodos que se desarrollaron son:

- Filtro de partículas. [Rodríguez, 2009]
- Seguimiento dinámico de rasgos. [Izquierdo, 2009]

#### 3.5.1 Filtro de partículas

El filtro de partículas es un método que tiene la característica de centrar la atención en el objeto o región que se desea rastrear, de modo que evita toda la demás área de las imágenes y eso lo hace un algoritmo pequeño en robustez. Hay casos especiales en los que las partículas se deben esparcir por toda la imagen pero solo son pocas ocasiones en

---

las que se requiere de este proceso, además de que esto solo tiene una duración de un cuadro en el video lo cual es bastante pequeño si se sabe que el procesamiento se lleva a cabo a una velocidad de 20 cuadros por segundo.

El filtro de partículas consta de 4 pasos principales que son:

- Inicialización.
- Actualización.
- Estimación.
- Predicción.

Estos pasos se describen a continuación:

En el primer instante del video se obtienen algunas características de la imagen que permiten empezar con el filtro de partículas.

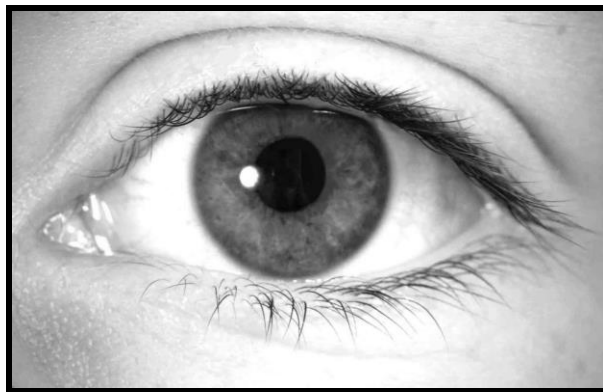


Figura 3.8 Primera imagen de donde se obtienen características relevantes para lograr el rastreo.

En la Figura 3.8 se puede ver el primer cuadro del video, esta imagen está en escala de grises, y es posible observar claramente un color negro en la pupila que se puede diferenciar del resto de la imagen, esa es la característica que se considera para empezar el filtro de partículas.

Inicialmente se tiene un pixel semilla que es el centro de la pupila, esto se puede observar en la Figura 3.9:

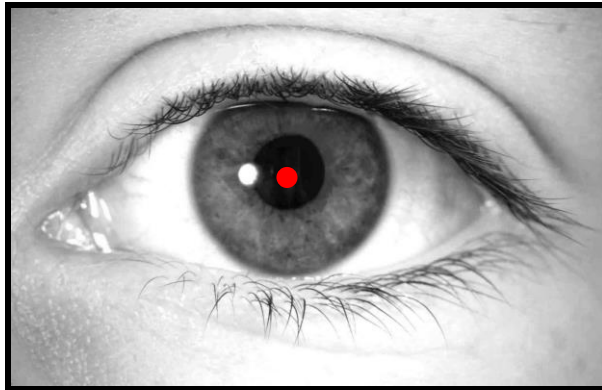


Figura 3.9 Imagen con el pixel semilla en rojo.

Una vez que se define el pixel semilla se inicializan las partículas en forma aleatoria alrededor de la zona de interés, en la Figura 3.10 se observa observar este paso:

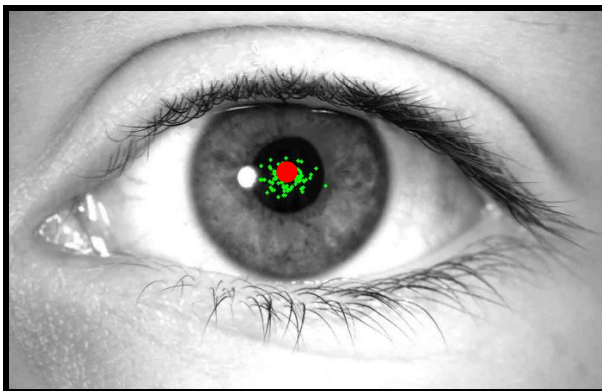


Figura 3.10 Partículas inicializadas en posiciones aleatorias.

El siguiente paso es la actualización, en él se le asigna un peso a cada partícula dependiendo del valor de la distancia euclidiana entre colores, donde la distancia más pequeña tendrá un peso mayor y la distancia más grande tendrá un peso menor.

Una vez obtenidos los pesos de todas las partículas se puede construir una gráfica de pastel en donde la rebanada más grande le pertenece a la partícula con mayor peso (Figura 3.11), es decir la más parecida en color al pixel semilla.

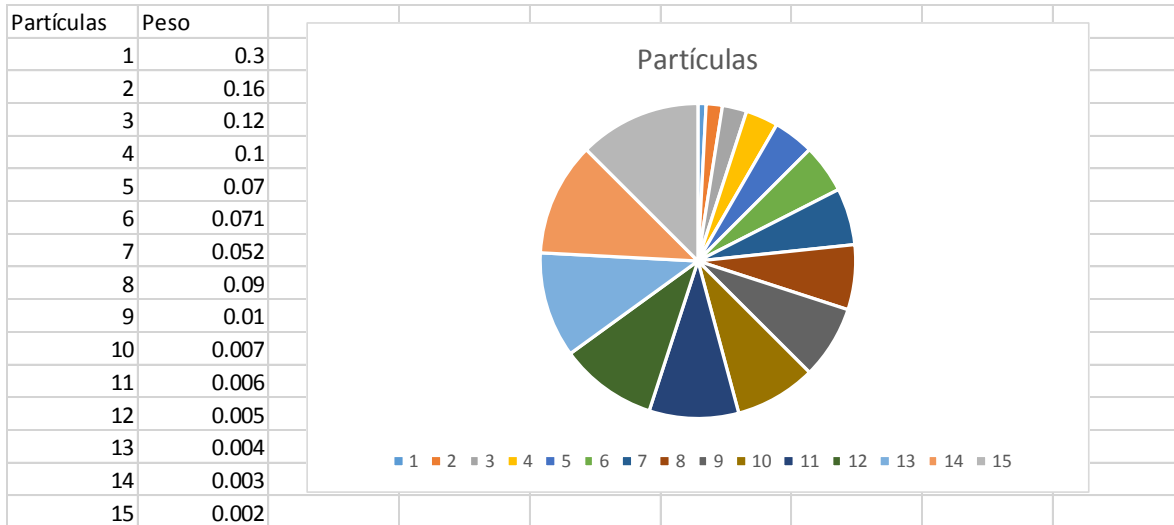


Figura 3.11 Ejemplo de una gráfica de pastel en donde las partes más grandes pertenecen a las partículas más parecidas en color al pixel semilla.

La estimación es el tercer paso del filtro y consiste en generar un nuevo conjunto de partículas aleatoriamente con el conocimiento de que es más probable generar partículas similares a las de mayor peso respecto a las demás. En este paso se debe generar un nuevo pixel semilla que es la media ponderada de todos los pesos de las partículas en el instante anterior.

Por último al obtenerse una nueva media por cada generación de partículas, se puede predecir hacia donde es posible que la región de interés se mueva en el instante siguiente y con ello finaliza el filtro de partículas.

### 3.5.2 Seguimiento dinámico de rasgos.

El segundo método implementado para lograr el rastreo de las pupilas es mediante seguimiento dinámico de rasgos. Este filtro se lleva a cabo de la siguiente manera: primero por cada cuadro que conforma el video se limita la zona de búsqueda, es decir, como los videos están controlados mediante un prototipo físico que evita que la cabeza de los pacientes tengan movimiento de modo que los ojos no salgan de cierta área del video, es posible reducir el área en donde posiblemente se encuentren las pupilas, ya que los movimientos naturales de ellas solo son en cierto perímetro. Este paso se observa en la Figura 3.12:



Figura 3.12 Imagen completa (izquierda) y limitación de zona de búsqueda (derecha).

Para lograr este objetivo se utiliza la información obtenida del primer paso que es la segmentación, gracias a esto se puede conocer en que posiciones (coordenadas) se encuentran las pupilas que son las zonas de interés, y partiendo de esos puntos se recorta la imagen a un tamaño razonable tomando como base el tamaño de los ojos de una persona.

Con el paso anterior también se reduce el costo de procesamiento ya que es solo una pequeña parte de las imágenes completas la que se somete a los siguientes pasos.

Una vez delimitada la zona de búsqueda se procede a segmentar esta imagen con el método de umbralización que es un método sencillo en donde se tiene un valor de umbral que permite separar las zonas oscuras del resto de la imagen, la elección de este filtro se debe a que gracias a las tomas infrarrojas es posible con este método separar las pupilas del resto de la imagen. El resultado de este filtro se puede observar en la Figura número 3.13:

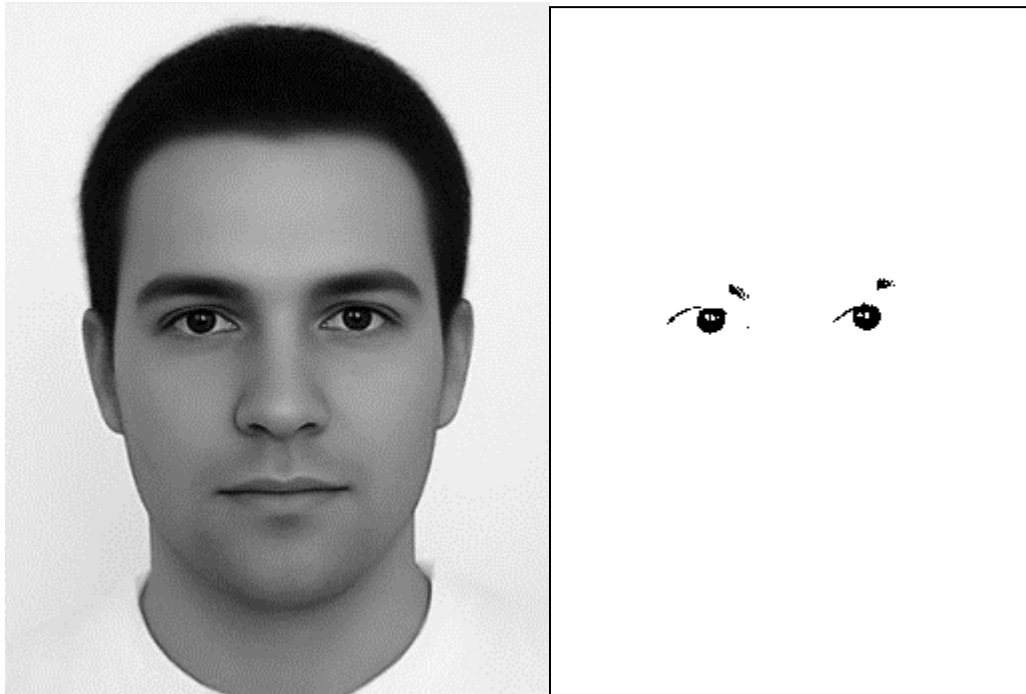


Figura 3.13 Imagen original (izquierda) e imagen resultante de la segmentación por umbralización (derecha).

En algunos casos no se elimina por completo todo el fondo, es decir aparecen algunas áreas o puntos que no pertenecen a las zonas de interés que son las pupilas. Estas áreas son distractores que se deben eliminar para que las pupilas queden limpias. Este objetivo se logra mediante dos filtros: dilatación y erosión [Roncagliolo, 2007].

La erosión disminuye el tamaño de todas las áreas que se encuentran en la imagen y la dilatación las aumenta, al combinar estos filtros las zonas más pequeñas son eliminadas, dejando únicamente las áreas que pertenecen a las pupilas, este proceso se observa en la Figura 3.14:



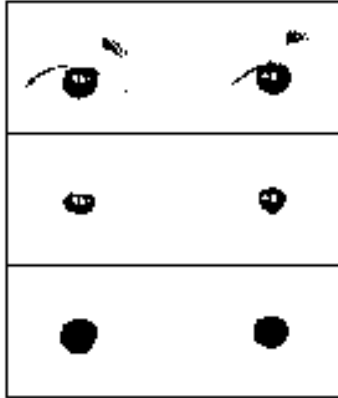


Figura 3.14 Imagen umbralizada (arriba), imagen erosionada (en medio) e imagen dilatada (abajo).

Con estos pasos se logra ubicar la atención en las zonas de interés, basta con encontrar el centro de las áreas en la imagen para saber en dónde se encuentran y en los próximos cuadros delimitar la búsqueda a esas posiciones ya que los movimientos no son bruscos, por otra parte en caso de que exista el cierre total de los ojos se procede a repetir todo este proceso.

### **3.6 Generación de la información relevante.**

El par de filtros de rastreo implementados arroja información relevante que se almacena en un archivo de texto, esta información es importante ya que en base a ella se puede determinar los movimientos oculares que se realizan así como la rapidez y la dirección. Esta información es: las coordenadas de las pupilas cada medio segundo así como los movimientos oculares registrados.

#### **Conclusiones.**

La metodología propuesta está basada en los objetivos que se desean alcanzar. El prototipo físico está diseñado en base a las medidas de un aparato real de uso médico, de modo que la implementación sea lo más similar posible a la realidad, además este diseño ofrece muchas ventajas para el procesamiento que posteriormente se realiza sobre los videos capturados y en gran medida es gracias a la iluminación infrarroja así como al ambiente controlado.

El hecho de implementar dos filtros diferentes de rastreo implica una serie de pasos diferentes para cada uno de ellos sin embargo algunos de los pasos se aplican por igual para los dos métodos.

---

## ***CAPITULO 4: DESARROLLO.***

El capítulo 4 muestra un ejemplo real de ambos filtros implementados, está dividido en secciones según las etapas de la metodología con la intención de ver qué resultados arroja cada una de ellas.

---

En este capítulo se muestra la forma en que se aplicaron cada uno de los pasos de la metodología general sobre los videos reales.

Como ya se ha visto anteriormente el rastreo es la esencia del proyecto, motivo por el cual se desarrollaron dos filtros para ese objetivo cada uno de ellos con sus propias características. Al término de este capítulo se puede hacer una comparación de ambos en cuestión del procesamiento que realiza cada uno.

#### 4.1 Construcción del prototipo físico.

Debido a los requerimientos de las pruebas fue necesaria la construcción e implementación del prototipo físico para la toma de los videos (Figura 4.1). Gracias a él es posible mantener controladas las condiciones del lugar de trabajo y esto favorece en gran medida a los resultados obtenidos.

Las características que se consiguen gracias al prototipo son:

- El rostro de las personas se mantiene firme sin movimientos.
- Ambos ojos son captados por la cámara.
- La iluminación tiene un alcance de 20 metros por lo que es fácil de manipular.
- Los movimientos oculares son controlados.

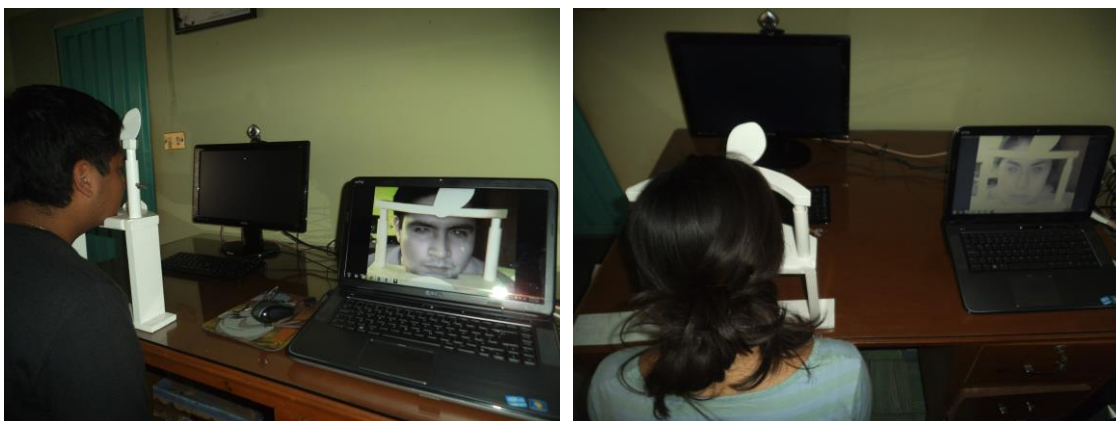


Figura 4.1 Prototipo físico. Base para el rostro, cámara, lámpara y computadora.

---

## 4.2 Obtención de las imágenes.

EL proceso de adquisición de imágenes se llevó a cabo mediante múltiples pruebas con los diferentes dispositivos con los que se contaba, al final se decidió utilizar la cámara infrarroja ya que al combinarla con una buena iluminación daba las mejores tomas.

A continuación se muestran algunas de las fotos conseguidas con la cámara seleccionada (Figura 4.2):



Figura 4.2 Imágenes obtenidas.

Para conformar la base de pruebas se obtuvieron 18 videos de personas con distintas características: edades (niños jóvenes y adultos), sexo, color de ojos, tamaño de pestañas, algunas con maquillaje (rímel), también la duración de los videos es variable, además de que la reacción de las pupilas a la iluminación infrarroja es diferente en cada persona. Se tiene esta diversidad de videos debido a que las pruebas reales se realizan a todo tipo de personas y es vital hacer experimentos con la mayoría de casos posibles.

## 4.3 Conversión a escala de grises.

El preprocesamiento de las imágenes que se aplicó consta únicamente de la transformación de las imágenes a color en su equivalente a escala de grises. A pesar de que las imágenes obtenidas parecen estar en tonalidades de gris, en realidad están en un

---

formato RGB (por sus siglas en inglés Red Green Blue) y es necesario aplicar el pase a niveles de gris.

Con esta mejora de la imagen se puede conseguir mejores resultados y un procesamiento mucho más rápido y ligero.

## 4.4 Segmentación de la pupila.

### 4.4.1 Segmentación para el filtro de partículas.

El proceso de segmentación se llevó a cabo para poder extraer información de la región que iba a ser víctima del rastreo, en este caso era la zona conformada por la pupila del ojo, la segmentación se lleva a cabo únicamente en la primer imagen de todo el conjunto y su análisis sirve para tener características que son de utilidad en los pasos siguientes de la aplicación.

El método utilizado para realizar la segmentación es el crecimiento de regiones, ya que ofrece los mejores resultados respecto a otros algoritmos de segmentación [Martín, 2004] (Otsu, umbralización) puesto que no es necesario hacer una búsqueda completa de las pupilas por toda la imagen sino que desde el principio se identifica en donde están y solo es necesario encontrar los límites de esas áreas. En las siguientes imágenes se observa este proceso (Figura 4.3):

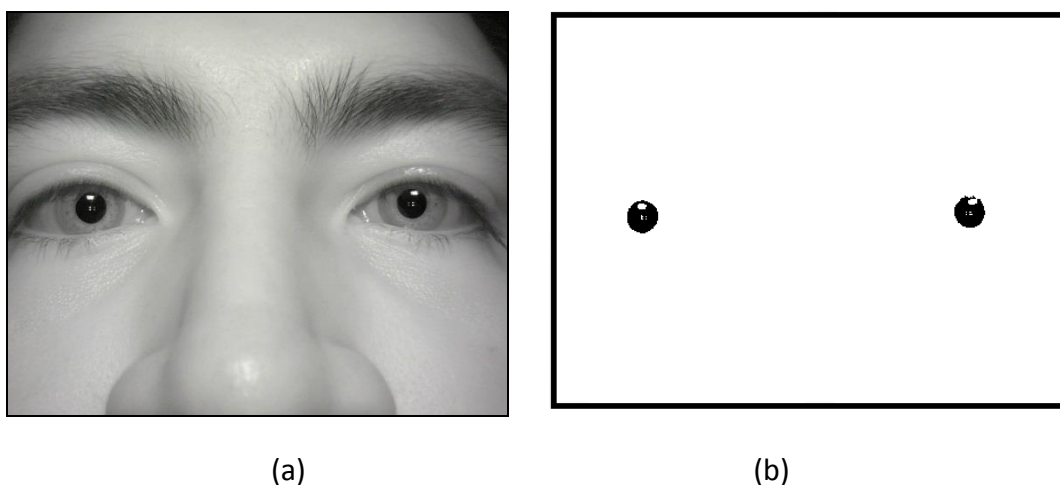


Figura 4.3 Primer cuadro del video (a) y pupilas segmentadas de ese cuadro (b).

---

En cuanto se ha hecho la segmentación se tiene como resultado dos regiones que son las zonas de interés, por lo que se puede extraer la información necesaria que hará posible mantener la atención de esos dos puntos. La mejor característica que se puede obtener es el color o el rango de colores en las que se encuentran las pupilas, es posible observar que son prácticamente negras sin embargo al analizar pixel por pixel de esas zonas se encuentran tonos que son muy cercanos al negro pero existe una diferencia significativa. Este rango de intensidades de gris, aparecen únicamente en las pupilas y quizá en algunas zonas oscuras, no obstante la posición de las pupilas delimitan la zona en donde es posible encontrar las regiones de interés.

#### 4.4.2 Segmentación para el seguimiento dinámico de rasgos.

El proceso de segmentación dentro del segundo método de rastreo no tiene la misma finalidad que en el filtro de partículas que es el de extraer información significativa de las áreas de interés, el objetivo de aplicar este paso es únicamente separar dichas áreas del fondo de las imágenes con la finalidad de conocer en qué posición se encuentran.

La elección del método de umbralización por Otsu para alcanzar este objetivo radica en que no se requiere un método muy complejo ya que previamente se elimina gran parte de las imágenes y solo se necesitan separar las pupilas del resto de las escenas [Otsu, 1979].

El resultado de esta segmentación se ve en la Figura 4.4:

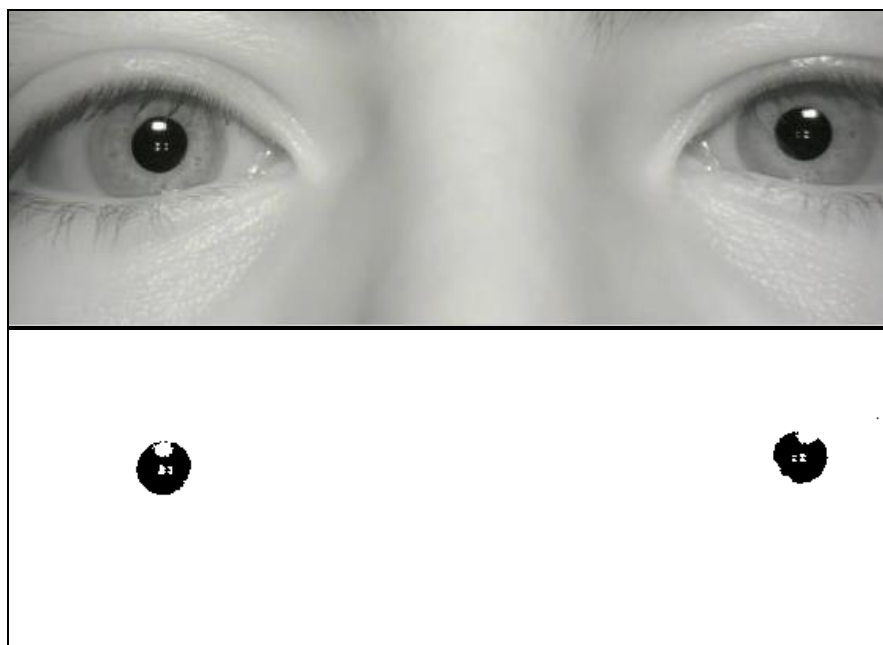


Figura 4.4 Imagen original (arriba) e imagen segmentada por umbralización (abajo).

---

## 4.5 Tracking de la pupila.

El rastreo de la pupila es la parte más compleja e importante de todo el proyecto ya que es quien genera los valores finalmente deseados.

### 4.5.1 Filtro de partículas.

El filtro de partículas es el primer método utilizado para conseguir este rastreo y consta de 4 pasos principales, el primer paso llamado inicialización (Figura 4.5) solo se efectúa al inicio del filtro y los otros tres pasos (Actualización, estimación y predicción) se llevan a cabo cuadro a cuadro (se repiten) hasta que la escena termine o el área rastreada desaparezca de las imágenes.

El desarrollo de estos pasos se lleva a cabo de la siguiente manera:

Para el primer paso llamado de actualización únicamente se generan un número  $n$  de partículas distribuidas conforme a una distribución normal alrededor de las áreas de interés, es decir que para cada partícula se generan un par de coordenadas aleatorias. Además se obtiene un pixel semilla mediante un clic inicial, este pixel nos servirá como un punto de partida para poder realizar los cálculos necesarios para los 3 siguientes pasos.

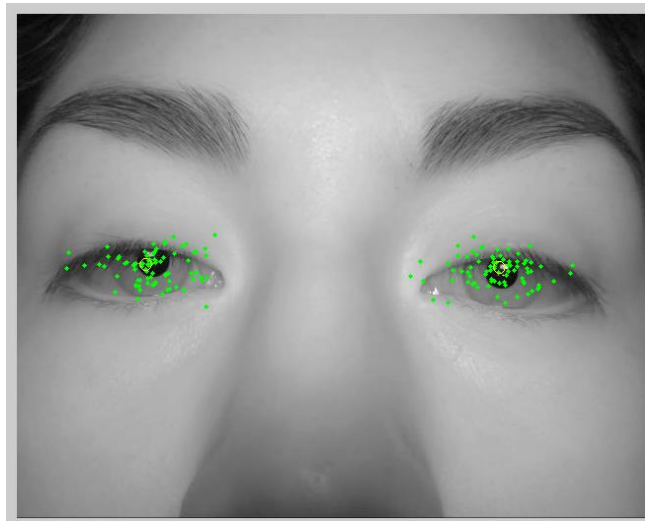


Figura 4.5 Inicialización de las partículas aleatoriamente (puntos verdes) y obtención del pixel semilla (asterisco amarillo).

Una vez obtenidos los valores de color de cada partícula así como del centro de la pupila se calculan los pesos correspondientes para cada partícula en función de la distancia euclidiana entre colores, es decir se compara cada valor de color de las partículas contra el color del pixel semilla. Los pesos más grandes corresponden a las partículas más parecidas o iguales a la semilla y por lo tanto son los mejores, de esta forma se calcula una media ponderada con estos valores y el resultado sirve como el nuevo pixel semilla. De esta forma se genera un nuevo conjunto de partículas regidas bajo una distribución estándar y dependiendo del valor de la media ponderada calculada en cada ciclo.

Los resultados del rastreo se muestran en el siguiente conjunto de imágenes (Figura 4.6).

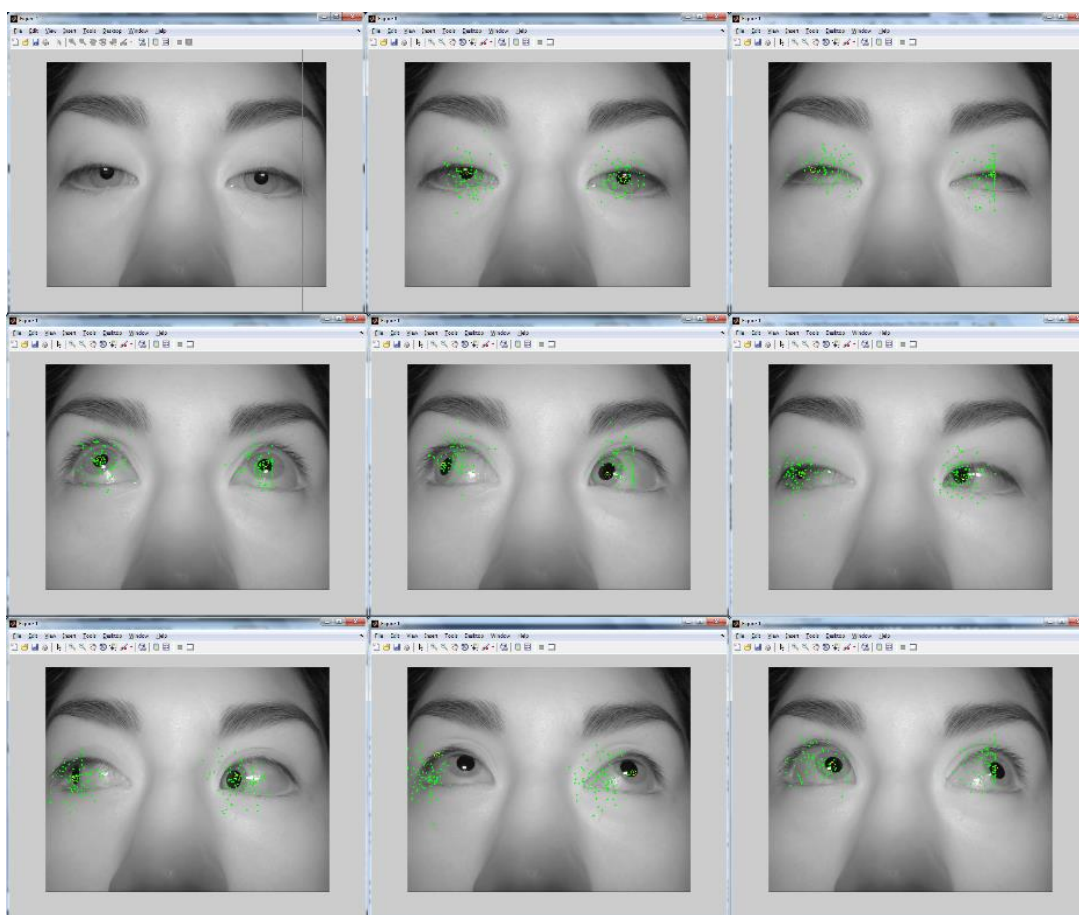


Figura 4.6 Muestra del filtro de partículas.



---

#### 4.5.2 Seguimiento dinámico de rasgos.

El seguimiento dinámico de rasgos se enfoca en encontrar un patrón de interés durante una secuencia de imágenes. Para este proyecto se toman en cuenta dos patrones que son las pupilas de los pacientes. Este método se divide en las siguientes etapas:

- Determinar la zona de búsqueda.
- Segmentar la zona de búsqueda.
- Eliminar distractores mediante los filtros de erosión y dilatación [Roncagliolo, 2007].
- Encontrar el patrón de interés.

Y se llevan a cabo de la siguiente manera:

Determinar la zona de búsqueda es delimitar el área en donde se van a buscar los patrones de interés. El prototipo físico cuenta con una base que mantiene fijo el rostro de los pacientes durante la toma de los videos y esto favorece a que no existan movimientos del rostro sino únicamente movimientos oculares, es decir que los ojos respecto al rostro siempre se encuentran en la misma posición y solo se registran movimientos de las pupilas. Esto permite delimitar la zona en donde es posible encontrar los patrones de interés. Este es el primer paso del seguimiento y se observa en la Figura 4.7:

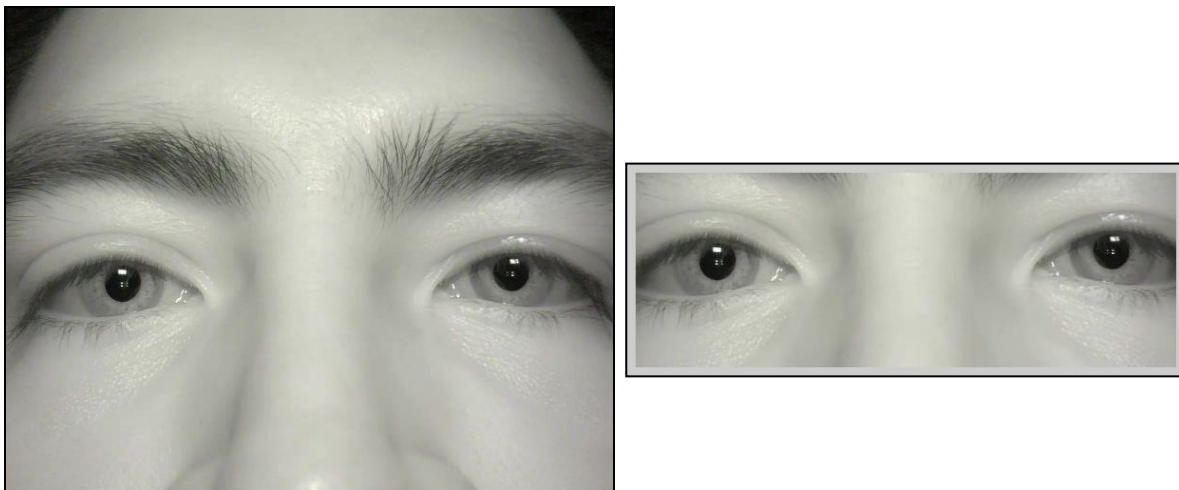


Figura 4.7 Imagen completa (izquierda) y zona de búsqueda (derecha).

Una vez hecho esto se procede a segmentar la zona de búsqueda por el método de umbralización automática. El objetivo es encontrar los patrones de interés dentro de esa zona. Cabe mencionar que ya que todas las personas son diferentes puede ser que un umbral definido no funcione adecuadamente para todos los casos por lo que el umbral se

---

calcula automáticamente por el método de Otsu [Otsu, 1979], dependiendo de las características de cada secuencia de imágenes. La segmentación se puede observar en la Figura 4.8:

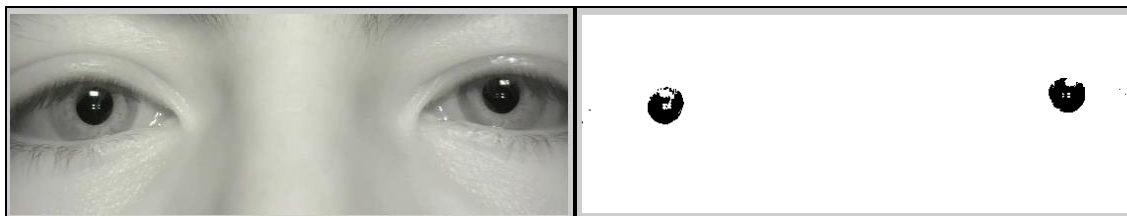


Figura 4.8 Imagen en escala de grises (izquierda) e imagen umbralizada (derecha).

El resultado de la segmentación no siempre proporciona un resultado final óptimo, en ocasiones pueden aparecer áreas que no pertenecen a los patrones de interés, por lo que se deben eliminar. Esto se logra mediante la aplicación de dos filtros: erosión y dilatación que combinados eliminan las zonas que no son de interés dejando limpias las pupilas [Roncagliolo, 2007].

Este proceso se puede observar en la Figura 4.9:

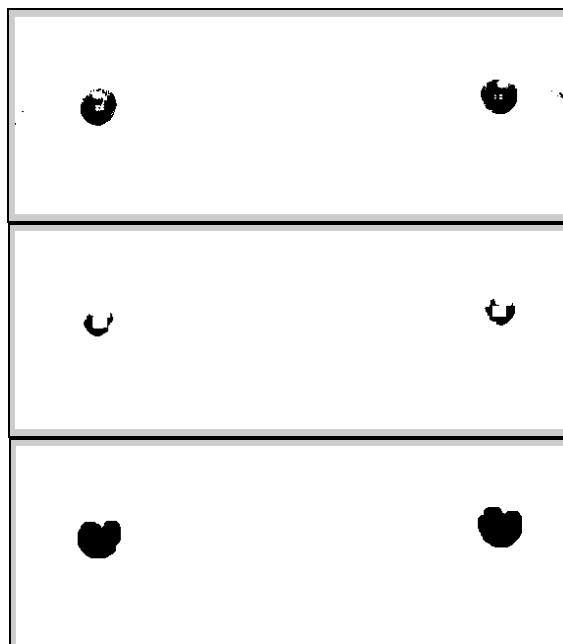


Figura 4.9 Imagen segmentada (arriba), erosionada (en medio) y dilatada (abajo).

---

Terminado el paso anterior se obtiene una imagen en donde solo aparecen los patrones de interés. El último paso es encontrar las posiciones de las áreas resultantes para que en los cuadros posteriores se realice la búsqueda cerca de dichas zonas, esto se hace buscando en la imagen segmentada las dos zonas que son rastreadas (en realidad el resultado es una imagen binarizada en donde solo se observan las pupilas segmentadas), en pantalla se muestra la imagen original pero en realidad la procesada no es la que se observa. En la Figura 4.10 se observa este paso:



Figura 4.10 Patrones de interés marcados en la imagen original.

Todos estos pasos se repiten en cuadros sucesivos. Cuando aparecen cuadros en donde los ojos se cierran totalmente se procede a delimitar nuevamente las áreas de búsqueda y los pasos posteriores se repiten nuevamente. Una parte de la corrida de este método se puede observar en la Figura 4.11:



Figura 4.11 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos.

## Conclusiones.

Como se puede observar en este capítulo, la metodología propuesta funciona de manera adecuada para ambos filtros de rastreo. Hay que recordar que desarrollar un prototipo a la medida de las necesidades favorece al proyecto en muchos aspectos.

Una aportación al filtro de partículas es utilizar la distancia euclidiana entre colores en vez de la distancia entre píxeles como normalmente se hace. Este cambio se efectuó por las propiedades de las imágenes en donde claramente se pueden diferenciar las pupilas y el resto de las imágenes. Por el lado del seguimiento dinámico de rasgos se agregaron los filtros de erosión y dilatación que pertenecen a la categoría de operaciones morfológicas para mejorar los resultados del rastreo.

---

# ***CAPITULO 5: EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS***

En este capítulo se encuentran los resultados obtenidos por los dos filtros implementados de rastreo, se muestra la base de experimentación, un análisis mediante pruebas de desempeño de ambos métodos y el comportamiento de ambos filtros para algunos casos particulares.

---

## 5.1 Experimentación.

Dentro de los videos que conforman la base de pruebas se pueden encontrar distintos movimientos oculares como:

- Vista al centro.
- Movimientos hacia los extremos superiores izquierdo y derecho.
- Movimientos hacia los extremos inferiores izquierdo y derecho.
- Movimientos de un lado a otro.
- Movimientos de arriba hacia abajo.
- Movimientos en círculos.

Además un movimiento que también aparece en todos los videos pero que es involuntario es el parpadeo de los ojos.











Algunas de las condiciones previstas para el filtro son:

- El objetivo del filtro es rastrear las pupilas durante todo el tiempo de los videos, es decir no perder la atención sobre esas áreas.
- La efectividad disminuye cuando existe un movimiento ocular y este no es rastreado por el filtro. Todos los movimientos oculares de los pacientes son controlados por una animación digital que está visible frente a cada individuo.
- Existe cierre de los ojos, en ese movimiento la pupila deja de ser visible para el filtro, sin embargo, cuando el ojo vuelve a abrirse el centro de atención es recuperado, esto se debe a que no hay un cambio brusco en distancia de la pupila respecto a un cuadro y el siguiente.
- En algunos cuadros las pestañas de los pacientes se ven sobre la pupila, no obstante el filtro encuentra con efectividad el área de interés ya que con la iluminación infrarroja las pestañas se ven de tonalidad más clara de lo que son en realidad y el tono de las pupilas es bien distinguible a través de las pestañas.

## 5.2 Base de pruebas.

Se obtuvieron 18 videos para conformar la base de pruebas. A continuación en la Tabla 5.1 se muestran los principales tipos de personas que aparecen en ellos:

Tabla 5.1 Características de las personas a las que se les tomaron los videos.

Hombres		Mujeres	
	<b>Edad:</b> 11 años <b>Color de ojos:</b> café claro		<b>Edad:</b> 19 años <b>Color de ojos:</b> café oscuro
	<b>Edad:</b> 24 años <b>Color de ojos:</b> café oscuro		<b>Edad:</b> 32 años <b>Color de ojos:</b> Café claro
	<b>Edad:</b> 21 años <b>Color de ojos:</b> Café claro		<b>Edad:</b> 17 años <b>Color de ojos:</b> Café oscuro y pestañas con rímel.
	<b>Edad:</b> 22 años <b>Color de ojos:</b> miel		<b>Edad:</b> 15 años <b>Color de ojos:</b> café claro
	<b>Edad:</b> 25 años <b>Color de ojos:</b> café oscuro		<b>Edad:</b> 45 años <b>Color de ojos:</b> café claro

Para comprobar la efectividad de ambos filtros se utilizaron los 18 videos para la realización de pruebas, extrayendo 10, 20 y 30 cuadros por segundo. Además, se agregó ruido para verificar hasta qué punto seguía siendo posible el rastreo.

### 5.3 Experimentación con el filtro de partículas.

Los resultados obtenidos para casos particulares se muestran a continuación:

#### 5.3.1 Experimento 1. Prueba sobre personas con pupilas en tono oscuro. (11 personas)

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. En la Figura 5.1 se observan los principales pasos del filtro de partículas procesando imágenes de personas con ojos en tono oscuro. Una muestra del filtro de partículas sobre ojos en tonos obscuro se ve en la Figura 5.2

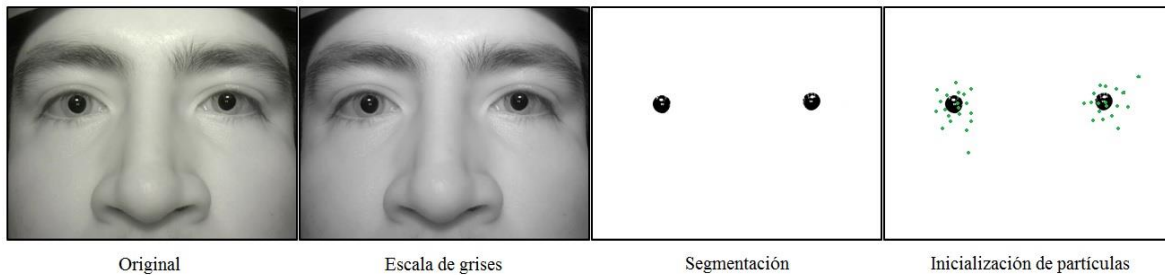


Figura 5.1 Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con pupilas en tonos oscuros.

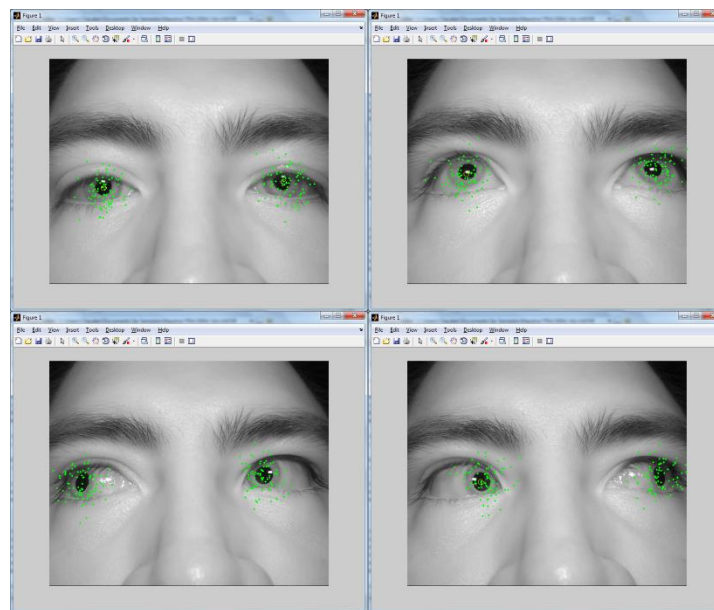


Figura 5.2 Muestra del filtro de partículas sobre pupilas en tono oscuro.



### 5.3.2 Experimento 2. Prueba sobre personas con pupilas en tono claro. (7 personas)

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. En la Figura 5.3 se observan los principales pasos del filtro de partículas procesando imágenes de personas con ojos en tono claro. Una muestra del filtro de partículas sobre ojos en tonos claro se ve en la Figura 5.4

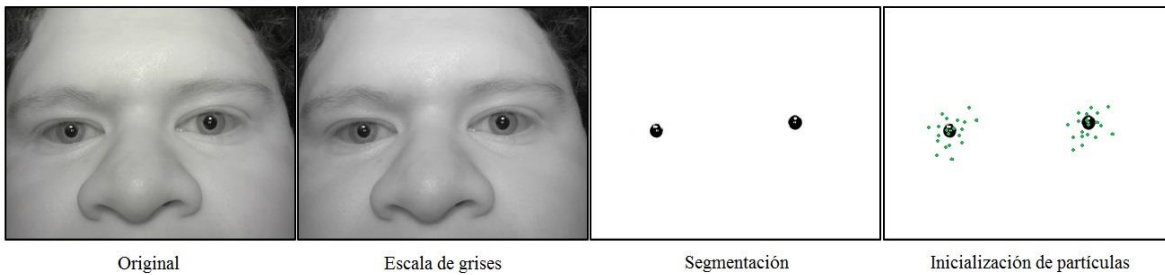


Figura 5.3 Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con pupilas en tonos claros.

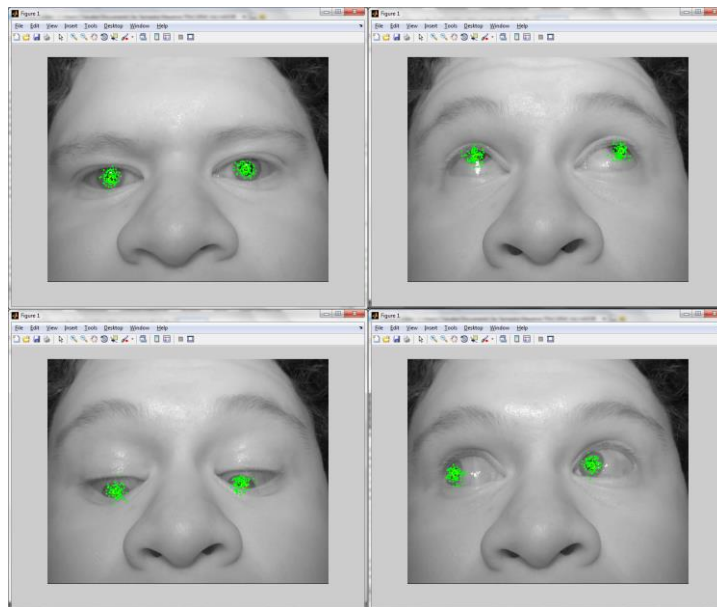


Figura 5.4 Muestra del filtro de partículas sobre pupilas en tono claro.

### 5.3.3 Experimento 3. Prueba sobre personas con la mirada hacia abajo.

Este experimento se incluye debido a que cuando las personas bajan la mirada, por lo regular sus pestañas aparecen encima de las pupilas y es importante analizar la respuesta del filtro a esta característica. La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. En la Figura 5.5 se observan los principales pasos del filtro de partículas procesando imágenes de personas con la mirada hacia abajo. Una muestra del filtro de partículas sobre personas con la mirada hacia abajo se ve en la Figura 5.6

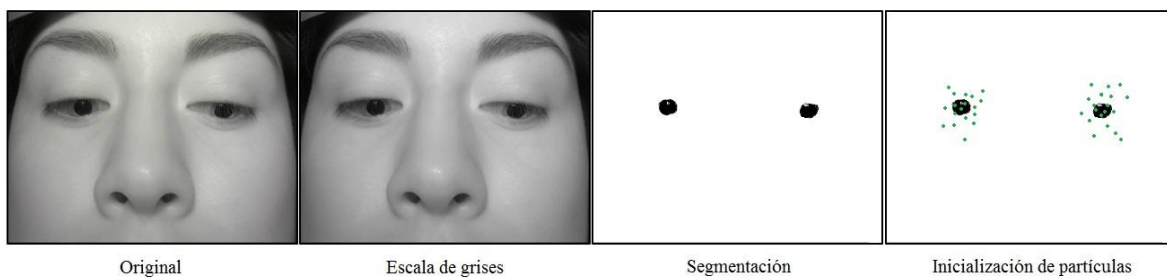


Figura 5.5 Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con la mirada hacia abajo.

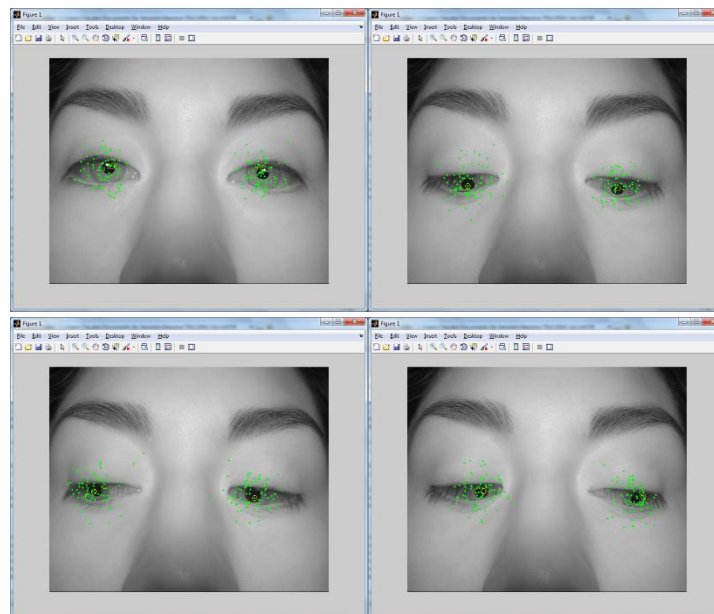


Figura 5.6 Muestra del filtro de partículas sobre pupilas mirando hacia abajo.

### 5.3.4 Experimento 4. Prueba sobre personas con los ojos cerrados.

En ocasiones el filtro no puede recuperar la atención en las pupilas, esto sucede porque al cerrarse los ojos el filtro no deja de calcular la distancia euclidiana de colores y al encontrarse con las pestañas que tienen un tono oscuro se confunde y ahora su centro de atención es esa nueva área, cuando el ojo se abre puede o bien recuperar las zonas de interés o en el peor de los casos no hacerlo en ningún momento. Puede existir pérdida total del centro de atención. En la Figura 5.7 se observa una muestra del filtro sobre un cierre de ojos en el que los centros de atención se recuperan satisfactoriamente mientras que en la Figura 5.8 se puede ver el caso contrario en donde el centro de atención es perdido para la pupila del lado izquierdo.

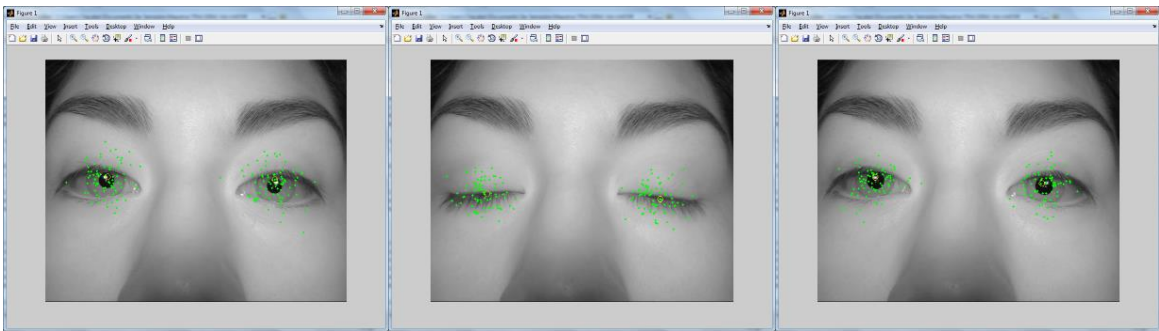


Figura 5.7 Muestra del filtro de partículas sobre ojos cerrados recuperando los centros de atención.

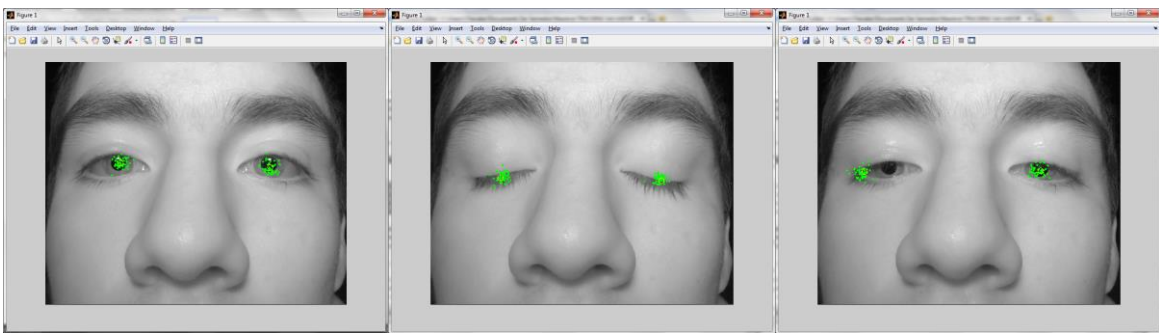


Figura 5.8 Muestra del filtro de partículas sobre ojos cerrados sin recuperar el centro de atención del lado izquierdo.

### 5.3.5 Experimento 5. Prueba sobre personas con pestañas con rímel.

Las pestañas con rímel propician a que el filtro se confunda puesto que esas zonas aparecen en una tonalidad mucho más oscura al grado de poderse confundir con el tono de las pupilas. Dependiendo de la cantidad de rímel utilizado el filtro puede dejar de rastrear por unos instantes las zonas de interés, o en el peor de los casos no recuperarlas durante toda la duración del video. En la Figura 5.9 se observan los principales pasos del filtro de partículas procesando imágenes de personas con pestañas con rímel. Una muestra del filtro de partículas sobre ojos con pestañas con rímel se ve en la Figura 5.10

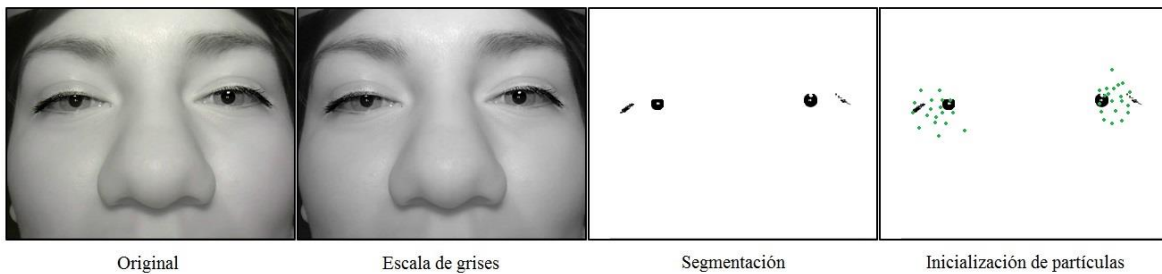


Figura 5.9 Resultado de los pasos del filtro de partículas en personas con pestañas con rímel.

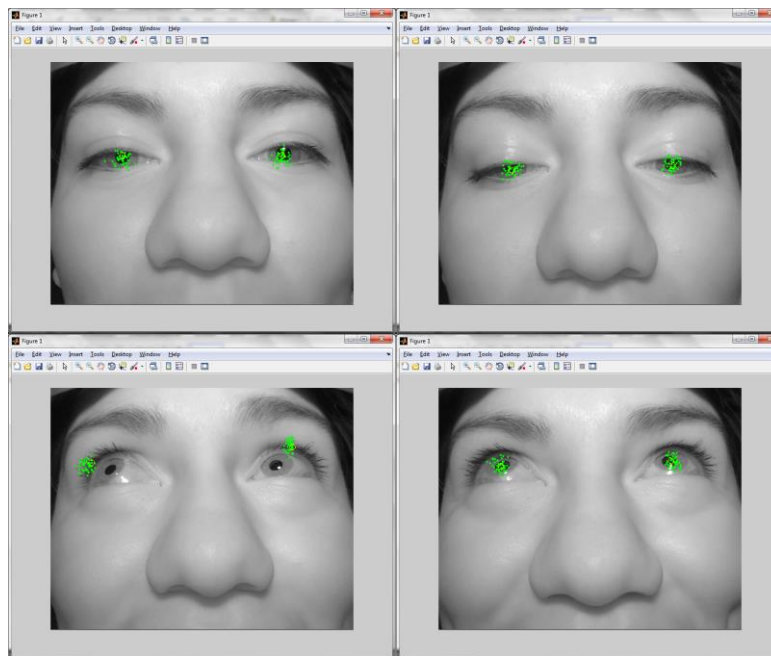


Figura 5.10 Muestra del filtro de partículas sobre ojos con pestañas con rímel perdiendo los centros de atención y recuperándolos en cuadros posteriores.

En la Tabla 5.2 se observa el porcentaje de efectividad en base a los falsos positivos (escenas en donde si aparecen las pupilas pero el programa detecta un distractor) y falsos negativos (escenas en donde no aparecen las pupilas pero aun así el programa detecta algo), esta tabla fué realizada tomando como base 20 cuadros por segundo. El promedio de la efectividad del filtro de partículas es del 84.19 %, su desventaja es cuando las pupilas desaparecen por completo de las escenas, en dos casos el filtro no pudo recuperar los centros de atención.

En la Tabla 5.3 se muestran las ocasiones en que ocurre el cierre total de los ojos en cada video y el número de cuadros que tarda el algoritmo en recuperar la atención. Hay casos en que el filtro se recupera satisfactoriamente después de haberse confundido con un distractor pero no necesariamente la recuperación es rápida ya que en uno de los casos ha tardado más de 100 cuadros en retomar el objetivo. En los videos 4 y 11 el filtro perdió por completo la atención sobre las áreas de interés.

Tabla 5.2 Falsos positivos y negativos en el filtro de partículas.

<b>Falsos positivos y falsos negativos.</b>				
<b>No. Video</b>	<b>Duración</b>	<b>Falsos positivos</b>	<b>Falsos negativos</b>	<b>% Efectividad</b>
1	36 seg	0	21	97.08333333
2	56 seg	0	235	79.01785714
3	49 seg	0	12	98.7755102
4	54 seg	1	0	0
5	54 seg	0	7	99.375
6	51 seg	0	16	98.51851852
7	45 seg	0	145	83.88888889
8	50 seg	0	8	99.2
9	50 seg	0	3	99.7
10	47 seg	0	16	98.29787234
11	57 seg	1	0	0
12	54 seg	0	24	97.77777778
13	67 seg	0	261	80.52238806
14	51 seg	0	12	98.82352941
15	61 seg	0	7	99.42622951
16	48 seg	0	6	99.375
17	64 seg	0	15	98.828125
18	58 seg	0	152	86.89655172
		11.60%	4.91%	84.20%

En la tabla 5.2 se puede observar los falsos positivos y falsos negativos arrojados por el filtro de partículas. Los valores al final de las columnas falsos positivos y falsos negativos indican el porcentaje de cuadros que pertenecen a cada factor respectivamente, el cálculo se hace tomando en cuenta el total de cuadros de todos los videos.

Tabla 5.3 Respuesta del filtro de partículas al cierre de los ojos.

<b>Escenas con cierre de ojos</b>				
<b>No. Video</b>	<b>Duración</b>	<b>No. de cierre de ojos</b>	<b>Perdida total de la atención.</b>	<b>Tiempo de recuperación (cuadros)</b>
1	36 seg	7	0	3
2	56 seg	5	0	47
3	49 seg	6	0	2
4	54 seg	7	1	No se recuperó
5	54 seg	7	0	1
6	51 seg	8	0	2
7	45 seg	6	0	176
8	50 seg	4	0	2
9	50 seg	3	0	1
10	47 seg	4	0	4
11	57 seg	6	1	No se recuperó
12	54 seg	8	0	3
13	67 seg	3	0	87
14	51 seg	6	0	2
15	61 seg	7	0	1
16	48 seg	3	0	2
17	64 seg	5	0	3
18	58 seg	4	0	38

## 5.4 Experimentación con el filtro de seguimiento dinámico de rasgos.

Los resultados obtenidos para casos particulares se muestran a continuación:

### 5.4.1 Experimento 1. Prueba sobre personas con pupilas en tono oscuro. (11 personas)

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. En la Figura 5.11 aparecen los principales pasos del filtro trabajando sobre imágenes de personas con ojos en tono oscuro. Una muestra del filtro funcionando se ve en la Figura 5.12

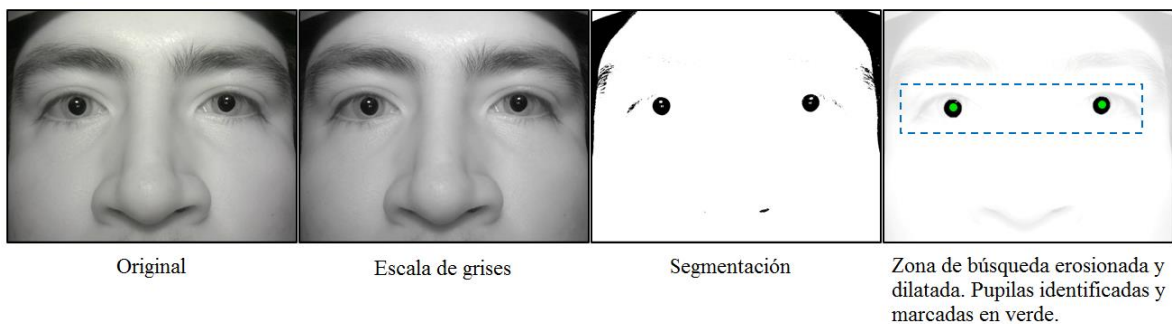


Figura 5.11 Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con pupilas en tonos oscuros.

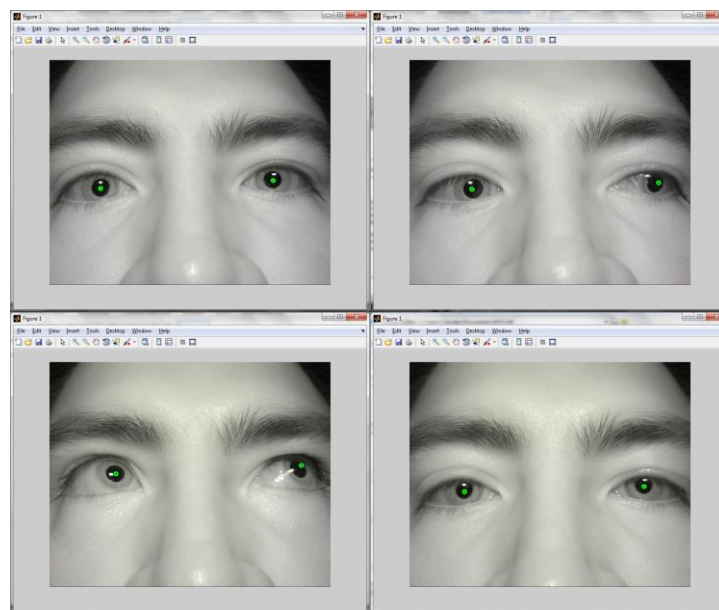


Figura 5.12 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre pupilas en tonos oscuros.

#### 5.4.2 Experimento 2. Prueba sobre personas con pupilas en tono claro. (7 personas)

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. Los resultados de los pasos principales del filtro procesando imágenes de personas con ojos en tono claro se observan en la Figura 5.13. En la Figura 5.14 aparece una muestra del seguimiento dinámico de rasgos trabajando con personas con ojos en tono claro.

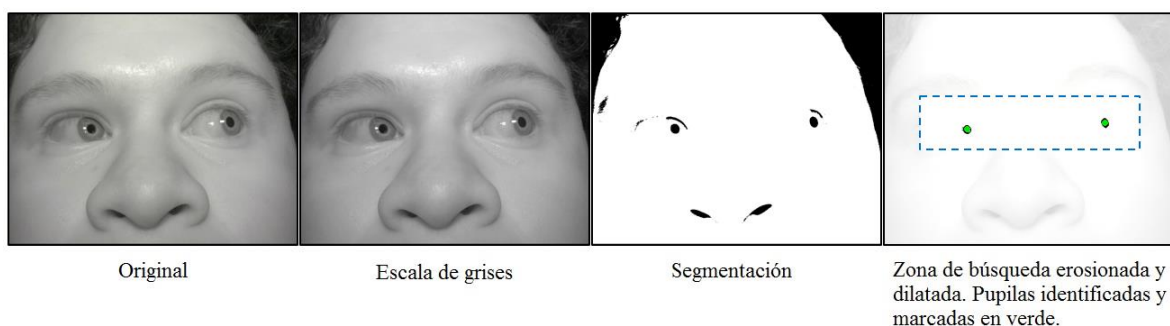


Figura 5.13 Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con pupilas en tonos claros.

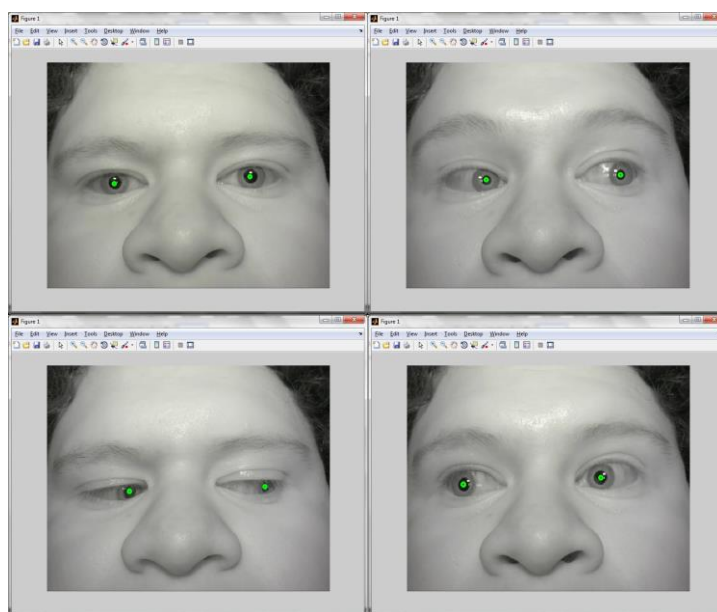


Figura 5.14 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre pupilas en tonos claros.



### 5.4.3 Experimento 3. Prueba sobre personas con la mirada hacia abajo.

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. Los pasos principales del filtro trabajando en personas con la mirada hacia abajo se ven en la Figura 5.15. El proceso del filtro cuando la mirada es hacia abajo se observa en la muestra de la Figura 5.16

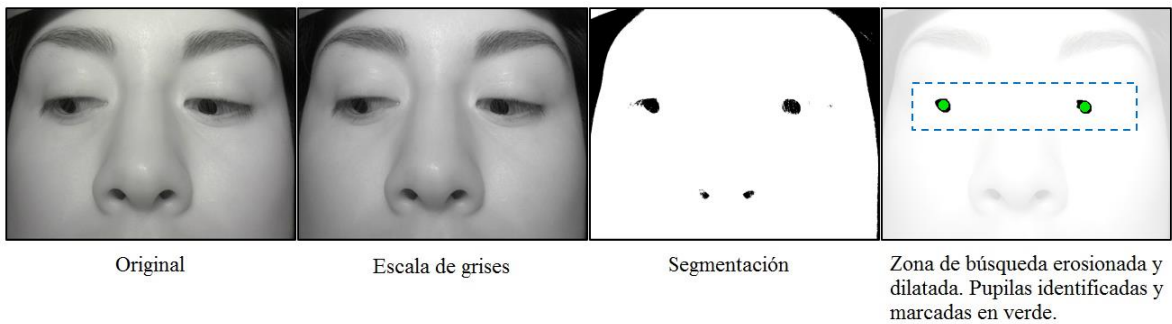


Figura 5.15 Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con la mirada hacia abajo.

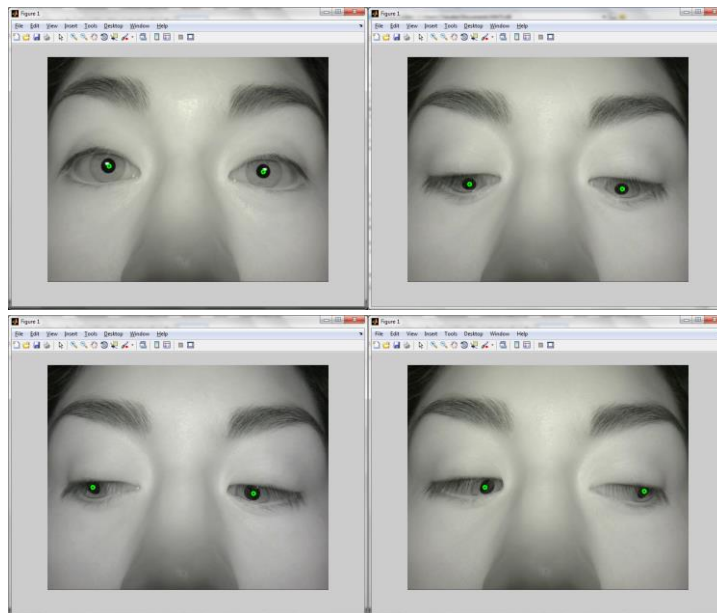


Figura 5.16 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre pupilas mirando hacia abajo.

#### 5.4.4 Experimento 4. Prueba sobre personas con los ojos cerrados.

El filtro encuentra nuevamente el centro de atención cuando el ojo se abre. En los cuadros en los que no aparecen las pupilas, el algoritmo no señala ninguna área hasta que se recuperan los patrones de rastreo. Esto es debido a que en caso de desaparecer las pupilas el procedimiento del filtro se repite desde el principio. En la Figura 5.17 aparecen los resultados de los pasos del seguimiento dinámico de rasgos cuando los ojos se cierran. En la Figura 5.18 se observa una muestra del filtro real trabajando con la oclusión de los ojos.

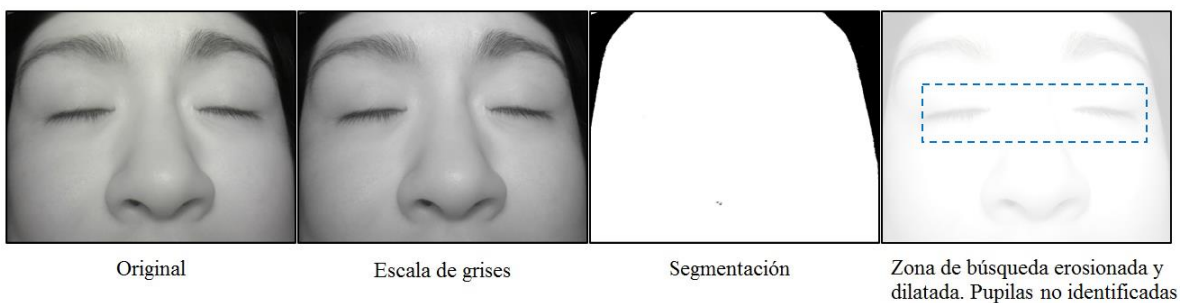


Figura 5.17 Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con los ojos cerrados.

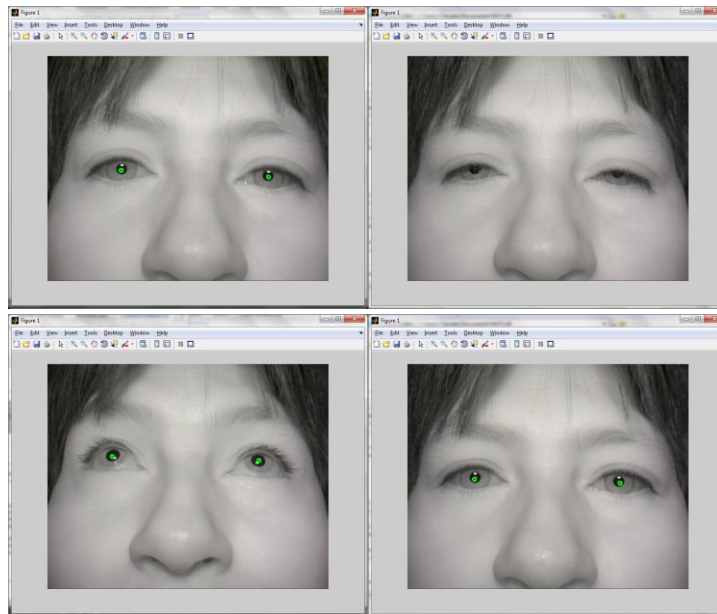


Figura 5.18 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos cerrados.

#### 5.4.5 Experimento 5. Prueba sobre personas con pestañas con rímel.

La segmentación de las pupilas se realiza de forma correcta. El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. El proceso del filtro se observa en la Figura 5.19, la muestra del filtro real trabajando con pestañas con rímel se encuentra en la Figura 5.20

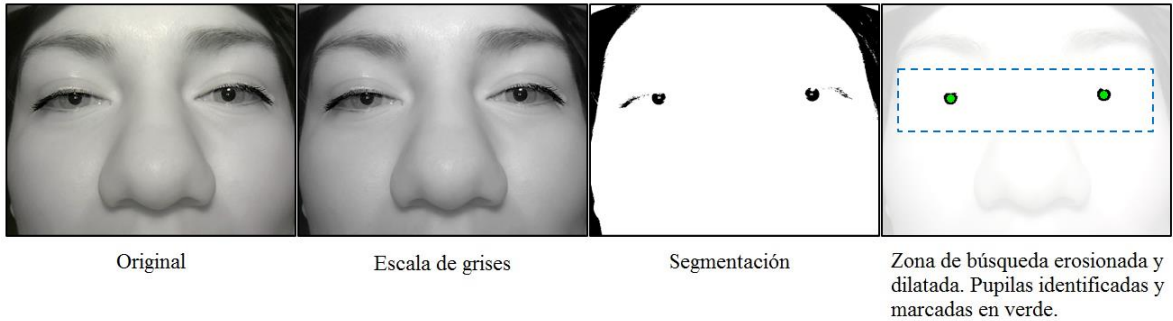


Figura 5.19 Resultado de los pasos del filtro de seguimiento dinámico de rasgos en personas con pestañas con rímel.

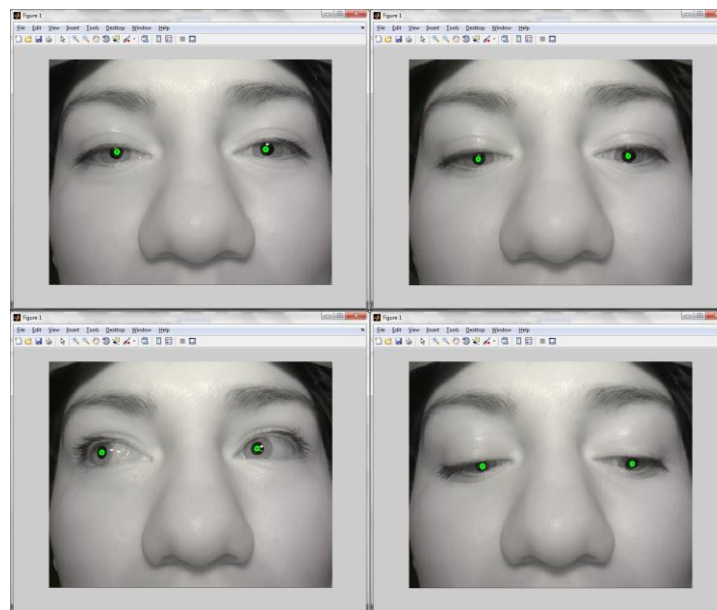


Figura 5.20 Muestra del seguimiento dinámico de rasgos sobre ojos con pestañas con rímel.

El filtro de seguimiento dinámico de rasgos cuenta con una ventaja respecto al filtro de partículas, esta se ve reflejada en la forma de responder a los videos en donde ocurre la oclusión de las pupilas, ya que a diferencia del primer filtro en que cuando ocurre ese problema el filtro de partículas nunca deja de seguir rastreando alguna zona llegando a confundirse con las pestañas principalmente. En este segundo filtro deja por completo de marcar las zonas de interés, esto se debe a la delimitación de la zona de búsqueda junto con la obtención temprana de una característica que le permite identificar el momento en que las pupilas han dejado de aparecer, en cuyo caso el filtro empieza su procesamiento desde el principio, se reinicia, lo cual le da la capacidad de recuperarse inmediatamente en el siguiente cuadro después de la nueva aparición de las pupilas.

La Tabla 5.4 muestra la efectividad del filtro en base a los falsos negativos y positivos que se presentan. En la tabla 5.5 se observa la forma en que responde el filtro a la desaparición de las pupilas.

Tabla 5.4 Falsos positivos y negativos en el seguimiento dinámico de rasgos.

<b>Falsos positivos y falsos negativos.</b>				
<b>No. Video</b>	<b>Duración</b>	<b>Falsos positivos</b>	<b>Falsos negativos</b>	<b>% Efectividad</b>
1	36 seg	18	0	97.5
2	56 seg	0	0	100
3	49 seg	11	0	98.87755102
4	54 seg	0	0	100
5	54 seg	14	0	98.75
6	51 seg	23	0	97.87037037
7	45 seg	0	0	100
8	50 seg	0	0	100
9	50 seg	6	0	99.4
10	47 seg	12	0	98.72340426
11	57 seg	0	0	100
12	54 seg	0	0	100
13	67 seg	18	0	98.65671642
14	51 seg	12	0	98.82352941
15	61 seg	18	0	98.52459016
16	48 seg	8	0	99.16666667
17	64 seg	13	0	98.984375
18	58 seg	27	0	97.67241379
		0.94%	0%	99.05275651

En la tabla 5.4 se observa que en ningún caso cuando las pupilas desaparecen el filtro las confunde con alguna otra zona (falso negativo), sin embargo hay algunas ocasiones en que estando las pupilas presentes el filtro señala las pestañas como zona de interés (falso positivo), ese error es apenas el .94% del total de cuadros de todos los videos.

Tabla 5.5 Respuesta del seguimiento dinámico de rasgos al cierre de los ojos.

Escenas con cierre de ojos				
No. Video	Duración	No. cierres	Perdida total de la atención.	Tiempo de recuperación (cuadros)
1	36 seg	7	0	1
2	56 seg	5	0	1
3	49 seg	6	0	1
4	54 seg	7	0	1
5	54 seg	7	0	1
6	51 seg	8	0	1
7	45 seg	6	0	1
8	50 seg	4	0	1
9	50 seg	3	0	1
10	47 seg	4	0	1
11	57 seg	6	0	1
12	54 seg	8	0	1
13	67 seg	3	0	1
14	51 seg	6	0	1
15	61 seg	7	0	1
16	48 seg	3	0	1
17	64 seg	5	0	1
18	58 seg	4	0	1

En la tabla 5.5 se nota la efectividad del seguimiento dinámico de rasgos para recuperar los centros de atención cuando estos desaparecen debido a los parpadeos de las personas, la velocidad de recuperación es instantánea (1 cuadro).

### 5.5 Resultados generales.

Ambos filtros son efectivos para llevar a cabo el rastreo, el filtro de partículas está apenas por debajo del 85% de efectividad mientras que el seguimiento dinámico de rasgos tiene un 99%. La principal desventaja del filtro de partículas frente al seguimiento dinámico, es cuando se presentan casos en donde las personas que se someten a las pruebas tienen rímel en las pestañas, esta característica hace que las pestañas adquieran un color más oscuro acercándose mucho al tono de las pupilas por lo que cuando existe cierre de los ojos el filtro de partículas no deja de buscar las zonas de interés y llega a confundirse con las pestañas, cuando las pupilas vuelven a aparecer existe la posibilidad de que se recupere el centro de atención o en el peor de los casos que no pueda volver a identificarlo y las partículas se generan alrededor de las pestañas hasta que finaliza la

secuencia de imágenes. El seguimiento dinámico de rasgos tiene la característica de identificar cuando desaparecen las pupilas y de ser así durante los cuadros siguientes repite todos los pasos que conforman al filtro, por lo que es hasta que las pupilas reaparecen que empieza nuevamente a rastrearlas, el filtro competidor tiene esa desventaja ya que nunca reinicia su proceso. En la Tabla 5.6 se observa una comparación de los tiempos de ejecución.

Tabla 5.6. Comparación de los tiempos de ejecución.

Tabla comparativa de tiempos.										
No. Video	Duración	Cuadros (30/seg)	Prueba 1		Cuadros (20/seg)	Prueba 2		Cuadros (10/seg)	Prueba 3	
			Filtro 1	Filtro 2		Filtro 1	Filtro 2		Filtro 1	Filtro 2
1	36 seg	1100	0.92	4.03	720	0.60	2.64	360	0.30	1.32
2	56 seg	1680	1.40	6.16	1120	0.93	4.11	560	0.47	2.05
3	49 seg	1470	1.23	5.39	980	0.82	3.59	490	0.41	1.80
4	54 seg	1620	1.35	5.94	1080	0.90	3.96	540	0.45	1.98
5	54 seg	1620	1.35	5.94	1120	0.93	4.11	560	0.47	2.05
6	51 seg	1530	1.28	5.61	1080	0.90	3.96	540	0.45	1.98
7	45 seg	1350	1.13	4.95	900	0.75	3.30	450	0.38	1.65
8	50 seg	1500	1.25	5.50	1000	0.83	3.67	500	0.42	1.83
9	50 seg	1500	1.25	5.50	1000	0.83	3.67	500	0.42	1.83
10	47 seg	1410	1.18	5.17	940	0.78	3.45	470	0.39	1.72
11	57 seg	1710	1.43	6.27	1140	0.95	4.18	570	0.48	2.09
12	54 seg	1620	1.35	5.94	1080	0.90	3.96	540	0.45	1.98
13	67 seg	2010	1.68	7.37	1340	1.12	4.91	670	0.56	2.46
14	51 seg	1530	1.28	5.61	1020	0.85	3.74	510	0.43	1.87
15	61 seg	1830	1.53	6.71	1220	1.02	4.47	610	0.51	2.24
16	48 seg	1440	1.20	5.28	960	0.80	3.52	480	0.40	1.76
17	64 seg	1920	1.60	7.04	1280	1.07	4.69	640	0.53	2.35
18	58 seg	1740	1.45	6.38	1160	0.97	4.25	580	0.48	2.13

Los tiempos de ejecución son medidos en segundos. Para el cálculo se tomó en cuenta únicamente el proceso de ambos filtros eliminando la parte visual, es decir computacionalmente no aparecía en pantalla todo el proceso ya que esto aumenta drásticamente el tiempo de procesamiento de ambos métodos.

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados de efectividad de los filtros aumentando ruido a las imágenes procesadas, esto se hace pensando en la posibilidad de que en un determinado momento la cámara que realiza las capturas se ensucie o sufra algún rayón. Las pruebas agregando ruido fueron exactamente las mismas que se mencionan en este capítulo para cada filtro. Con 15 % de ruido la eficiencia del filtro de partículas es del 69 % en promedio, por lo que ya no es efectivo el rastreo de las pupilas, el seguimiento dinámico de rasgos baja del 99 % de efectividad sin ruido al 81 % con el 15 % de ruido. Se espera que las condiciones para el correcto funcionamiento de ambos filtros sea siempre el óptimo para evitar pérdida de eficiencia.

Tabla 5.7. Efectividad de los filtros agregando ruido.

Efectividad agregando ruido.								
No. Video	Sin ruido		Ruido 5%		Ruido 10%		Ruido 15%	
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2
1	97.08	97.50	95.58	96.00	90.65	91.06	79.74	80.15
2	79.02	100.00	77.52	98.50	72.58	93.56	61.67	82.65
3	98.78	98.88	97.28	97.38	92.34	92.44	81.43	81.53
4	0.00	100.00	0.00	98.50	0.00	93.56	0.00	82.65
5	99.38	98.75	97.88	97.25	92.94	92.31	82.03	81.40
6	98.52	97.87	97.02	96.37	92.08	91.43	81.17	80.52
7	83.89	100.00	82.39	98.50	77.45	93.56	66.54	82.65
8	99.20	100.00	97.70	98.50	92.76	93.56	81.85	82.65
9	99.70	99.40	98.20	97.90	93.26	92.96	82.35	82.05
10	98.30	98.72	96.80	97.22	91.86	92.29	80.95	81.38
11	0.00	100.00	0.00	98.50	0.00	93.56	0.00	82.65
12	97.78	100.00	96.28	98.50	91.34	93.56	80.43	82.65
13	80.52	98.66	79.02	97.16	74.09	92.22	63.18	81.31
14	98.82	98.82	97.32	97.32	92.39	92.39	81.48	81.48
15	99.43	98.52	97.93	97.02	92.99	92.09	82.08	81.18
16	99.38	99.17	97.88	97.67	92.94	92.73	82.03	81.82
17	98.83	98.98	97.33	97.48	92.39	92.55	81.48	81.64
18	86.90	97.67	85.40	96.17	80.46	91.24	69.55	80.33

## 5.6 Generación de información relevante.

Uno de los objetivos específicos del desarrollo de este proyecto es proporcionar a los especialistas en salud visual, información que sea importante y necesaria para apoyarlos a diagnosticar más detalladamente a sus pacientes, y dado que los mejores resultados son arrojados por el filtro de seguimiento dinámico de rasgos, la información es obtenida de este filtro. La aplicación final está formada por dos módulos siendo el rastreo el primero de ellos, por lo que los datos que se obtienen no son los finales y pasan al siguiente módulo como archivos de texto que son procesados posteriormente.

Los dos tipos de información que se recaban son: las coordenadas de las pupilas y los movimientos que se realizan por ellas.

En este apartado se muestra gráficamente esta información. Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de las pupilas de acuerdo a las coordenadas que son obtenidas gracias al rastreo, cabe mencionar que es posible girarlas libremente en el sistema ofreciendo una mayor claridad en la información para quien lo utilice. Para su creación se utilizó una muestra del 10% del total de los cuadros que conforman los videos, extrayendo uno de cada veinte a una velocidad de veinte cuadros por segundo.

Las gráficas son creadas de la siguiente forma:

- Se utilizan gráficos en 3 dimensiones para poder representar los datos.

- El primer eje representa los cuadros que son procesados (10% del total) y por cada uno de ellos corresponde un par de coordenadas.
- El segundo eje es el que pertenece al eje de las X es decir el ancho de la imagen.
- El tercer y último eje es el correspondiente al eje de las Y y representa la altura de la imagen.

Por cada video se genera una gráfica que contiene las coordenadas de ambos ojos, para comprender mejor la información se muestran tres vistas de esta gráfica por cada video, en la primera se observan los tres ejes, en la segunda aparece una vista de frente es decir solo de las coordenadas de las pupilas y en la tercera se observa una vista aérea de la gráfica que permite ilustrar el transcurso de los cuadros analizados. Dentro de las gráficas se pueden observar espacios en blanco dentro de la secuencia de coordenadas que significan un cierre de ojos en ese instante.

Los gráficos varían dependiendo de la duración y de los movimientos oculares que se registraron para cada video.

Solo se muestran los gráficos para casos particulares ya que en la mayoría se presentan cierres de ojos distintos movimientos que son repetidos en las demás secuencias.

### 5.6.1 Gráficos para videos con personas con pupilas en tonos oscuros.

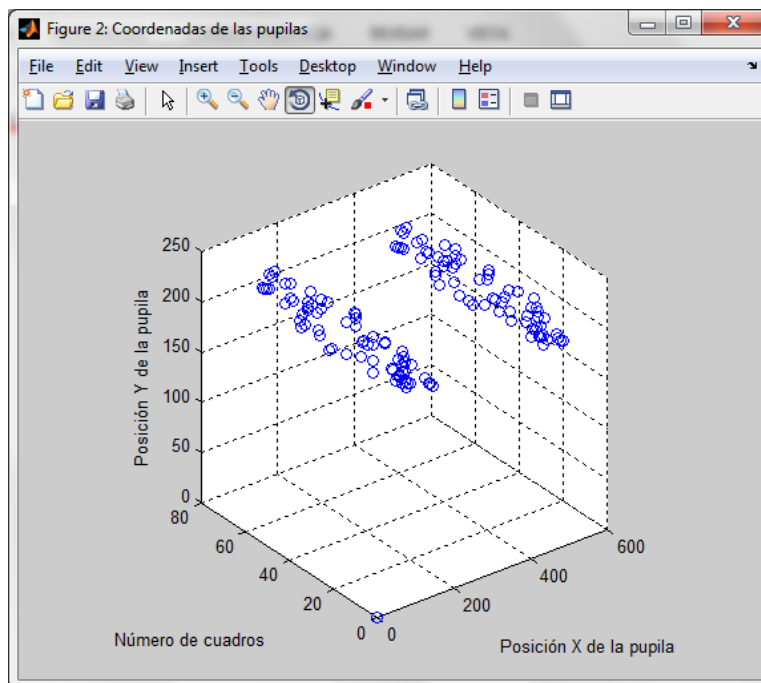


Figura 5.21 Gráfica de coordenadas para pupilas en tonos oscuros.



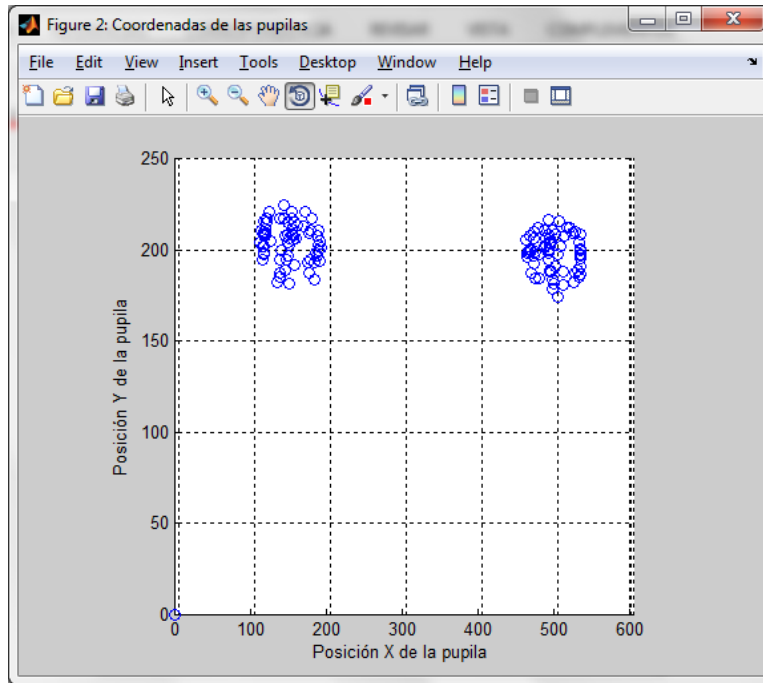


Figura 5.22 Gráfica frontal de pupilas en tonos oscuros.

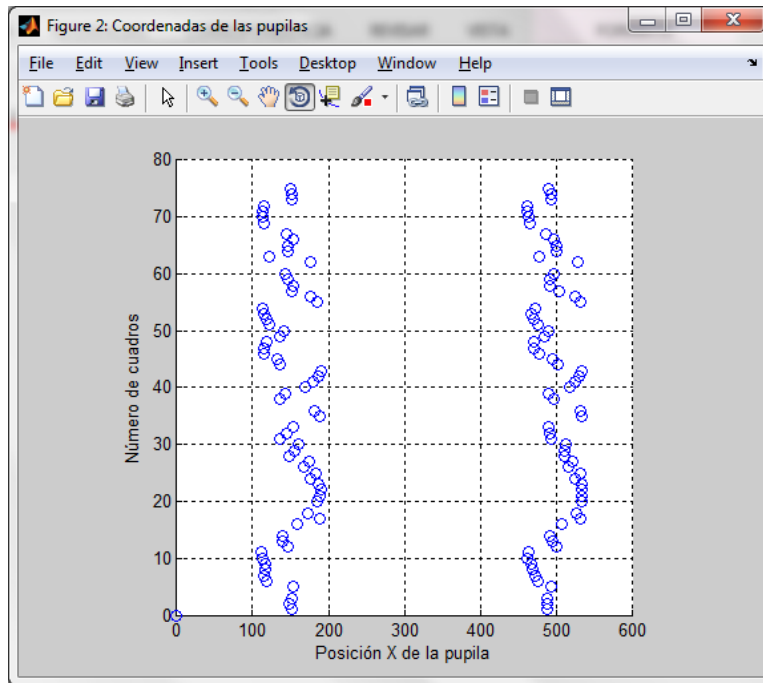


Figura 5.23 Gráfica aérea de pupilas en tonos oscuros.

## 5.6.2 Gráficos para videos con personas con pupilas en tonos claros.

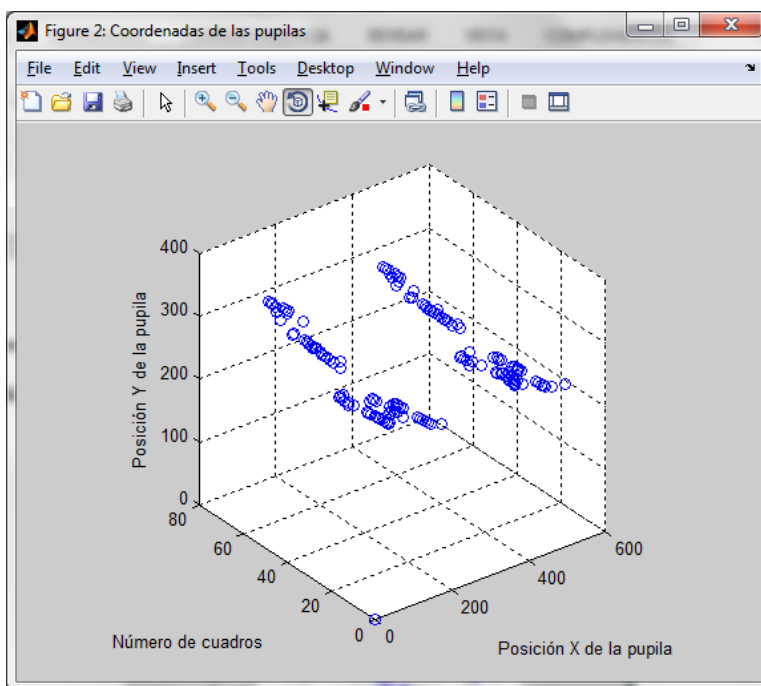


Figura 5.24 Gráfica de coordenadas para pupilas en tonos claros.

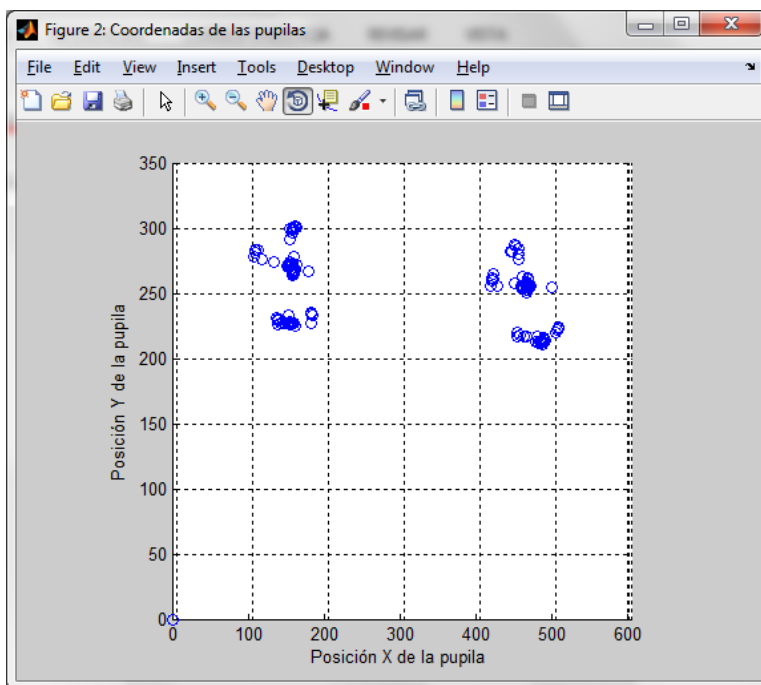


Figura 5.25 Gráfica frontal de pupilas en tonos claros.

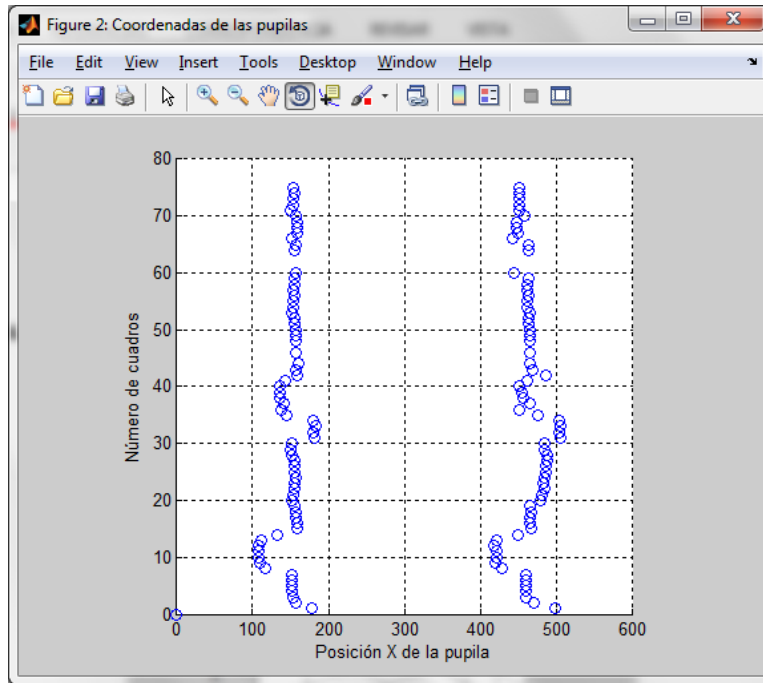


Figura 5.26 Gráfica aérea de pupilas en tonos claros.

### 5.6.3 Gráficos para videos con personas con pestañas con rímel.

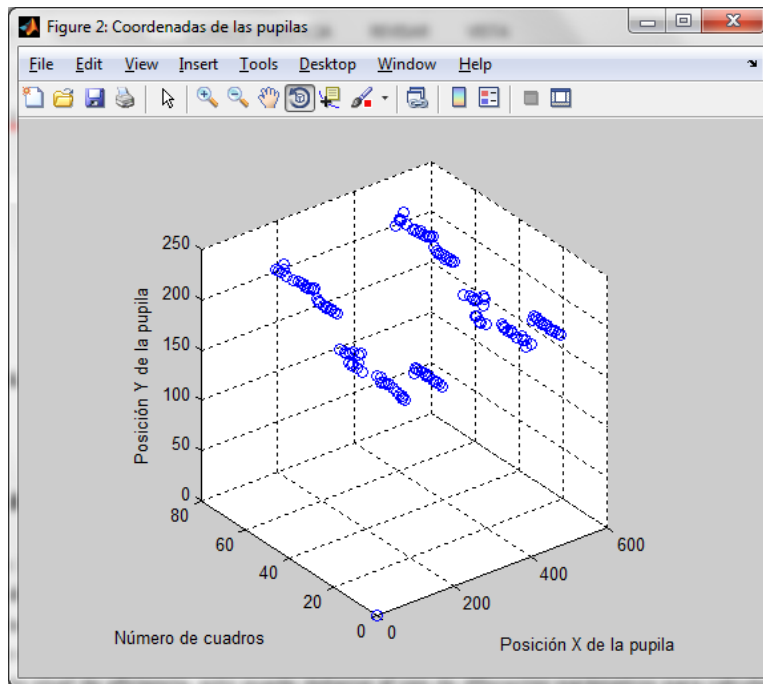


Figura 5.27 Gráfica de coordenadas para ojos con pestañas con rímel.

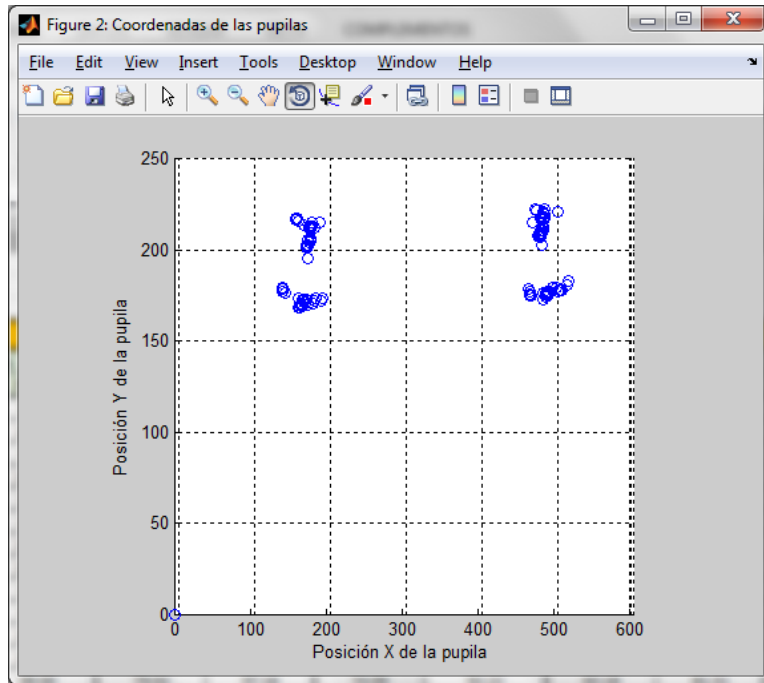


Figura 5.28 Gráfica frontal de ojos con pestañas con rímel.

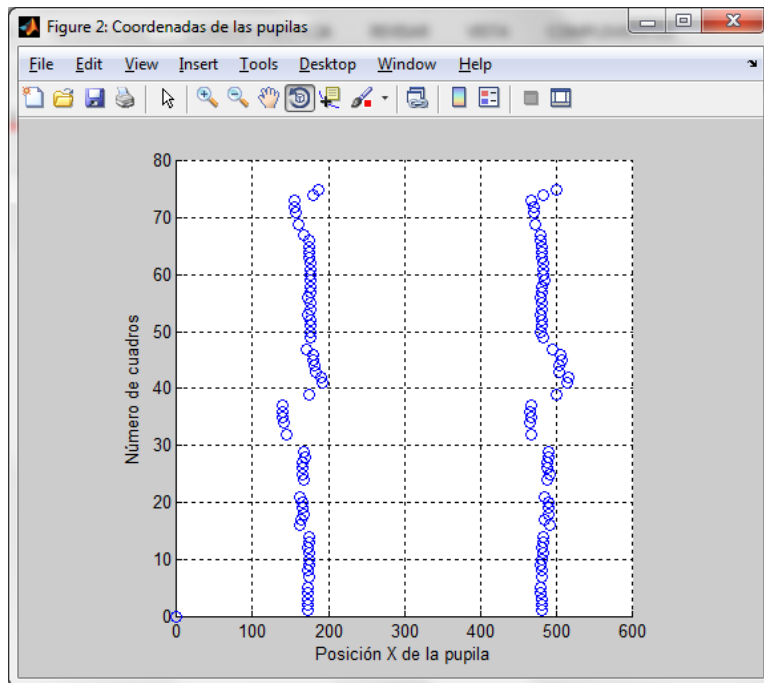


Figura 5.29 Gráfica aérea de ojos con pestañas con rímel.

## 5.7 Comparación con otros trabajos.

En la tabla 5.8 se puede observar una comparación de los filtros propuestos en este trabajo con otros trabajos relacionados al rastreo ya sea de pupilas o de objetos, si se observa el porcentaje de eficiencia se puede notar que el filtro de seguimiento dinámico de rasgos es el más elevado mientras que la propuesta de filtro de partículas tiene el más bajo nivel de eficiencia, esto puede deberse al uso de diferentes parámetros para calcular ese factor sin embargo con esta tabla se puede hacer la idea de que tan buenos son los métodos desarrollados.

Tabla 5.8 Comparación con otros trabajos.

Trabajo	Técnica	Porcentaje de eficiencia
Filtro de partículas en el diseño de un sistema de rastreo preciso de la pupila. (Sadri et al., 2012)	Filtro de partículas, algoritmo snake. Cámara infrarroja	97%
Rastreo del ojo en tiempo real en entornos sin restricciones. (Tajeri et al., 2012)	Filtro de Kalman, detección de orillas y distancia euclidiana.	91.90%
Eye tracking en tiempo real y detección de parpadeo con cámaras USB. (Chau y Betke, 2005)	Filtros de umbralización, imágenes binarias, convolución y eliminación de ruido	87.40%
Propuesta 1. Filtro de partículas.	Segmentación por crecimiento de regiones, filtro de partículas y distancia euclidiana.	85%
Propuesta 2. Seguimiento dinámico de rasgos	Segmentación por umbralización, filtros morfológicos, seguimiento dinámico de rasgos y recorte de imágenes	99%

---

## **Conclusiones.**

En el capítulo 6 se muestran las pruebas de rendimiento realizadas a cada uno de los 18 videos que conforman la base experimental del proyecto, con la finalidad de definir cuál de los dos filtros es el más óptimo para aplicarlo en el sistema final. Como se puede observar el filtro de seguimiento dinámico de rasgos es el que presenta mejores resultados para todos los casos analizados. Además en una comparación con otros trabajos relacionados también muestra un mayor porcentaje de efectividad.

La información que se proporciona al final del procesamiento de las secuencias de video, se puede encontrar en formato de archivo de texto que servirá para su posterior análisis, sin embargo ver esta información gráficamente como se mostró en este capítulo puede permitir que los especialistas observen el comportamiento de las pupilas de las personas, pudiendo generar algunas conclusiones previas, por lo que es una opción posible para mostrar los resultados.

---

## ***CAPITULO 6:***

# ***CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO***

En este capítulo se concluye el trabajo en general, se dan unos breves comentarios finales y por último se puntualiza acerca del trabajo que se puede realizar en el futuro sobre este proyecto.

---

## 6.1 Conclusiones.

Visión artificial es un tema que se ha desarrollado desde hace más de 50 años, y sin embargo no deja de extenderse. En la actualidad se cuenta con más y mejores dispositivos y ordenadores que facilitan el desarrollo en esta materia. En la actualidad muchos sectores aplican técnicas de procesamiento digital de imágenes para sus propios objetivos, la medicina, la industria, la seguridad, y la robótica por mencionar algunos.

En el área de la medicina se encuentran los especialistas en salud visual, que poco a poco se han adentrado en las nuevas tecnologías para apoyarse y proporcionar un mejor servicio. De aquí nace el objetivo principal de esta tesis, crear una herramienta que apoye a los especialistas en salud visual a diagnosticar con mayor precisión a sus pacientes. Esta tesis aborda una de las partes de la herramienta final: rastrear las pupilas mediante técnicas de visión artificial para generar información relevante que posteriormente será analizada por otro módulo de la herramienta final.

Se realizó una investigación previa para conocer los temas que apoyarían al desarrollo del proyecto, en el marco teórico Capítulo 2 se habla de todos los temas significativos para alcanzar los objetivos planteados al inicio. Adquiridos los conocimientos se desarrolló la metodología encontrada en la sección 3.1 que sirvió para tener diferenciadas las etapas adecuadas para lograr las metas.

Por las características del problema surgió la necesidad de desarrollar físicamente un prototipo que permitiera realizar pruebas exactamente como lo haría un especialista. En la sección 3.2 se puede observar el diseño del prototipo físico y en la sección 4.1 se observa el prototipo real. Con la construcción de la base física se pudieron obtener las secuencias de video para realizar las pruebas necesarias (ver sección 4.2).

Siguiendo las etapas fundamentales de un sistema de procesamiento digital de imágenes (ver apartado 2.2) se seleccionaron las siguientes técnicas para el desarrollo del proyecto: conversión a escala de grises, segmentación por crecimiento de regiones y por el método de Otsu, operaciones morfológicas (erosión y dilatación), recorte de las imágenes, rastreo por los métodos de filtro de partículas y seguimiento dinámico de rasgos.

Dado que el hecho de elegir alguna en técnica en particular debía estar sustentado, se aplicaron dos métodos para alcanzar el objetivo principal, es por eso que en la metodología (sección 3.1) se pueden observar dos caminos distintos en la parte central de la misma.

En el Capítulo 4 se explica cada uno de los métodos aplicados a los videos de prueba, mientras que en el capítulo 5 se encuentran los resultados de las pruebas sobre todos los videos. Algunos casos particulares también son mostrados en el capítulo 5 por ejemplo en la sección 5.3.3.



---

Ambos filtros implementados presentan una eficiencia excelente para realizar el rastreo, siempre y cuando las condiciones sean óptimas, se habla de secuencias de imágenes en donde las zonas que se pretende rastrear siempre están presentes. Esta es una limitación para el filtro de partículas (ver apartado 5.3.4), ya que para las características de la problemática se requiere de un programa que sea capaz de responder satisfactoriamente a problemas como la desaparición momentánea de las zonas de interés (oclusiones). Este problema puede ser corregido aumentando el número de partículas sin embargo esto haría más lento el procesamiento.

El filtro de seguimiento dinámico de rasgos es 99 % efectivo como se puede observar en la tabla 5.8 situada en la sección 5.7, aún en casos en donde las pupilas desaparecen por completo de las secuencias de imágenes, esto es gracias a su forma consecutiva de procesamiento y una de sus ventajas es que al reducir la zona de búsqueda desde el inicio el procesamiento se vuelve más rápido en comparación al buscar en las imágenes completas.

La velocidad entre los filtros es en general rápida ya que en los videos más largos de aproximadamente 1220 cuadros/seg. se registró un tiempo máximo de 4 segundos en total de procesamiento, este tiempo es arrojado por el filtro de partículas mientras que por el otro método se obtiene una velocidad de 1 segundo, por lo que se puede concluir que el seguimiento dinámico de rasgos es 3 veces más rápido que el filtro de partículas (datos encontrados en la tabla 5.6 en la sección 5.5).

Los dos filtros implementados fueron mejorados respecto a la forma en que se encuentran normalmente en la literatura, en el filtro de partículas se utilizó la distancia euclidiana entre partículas, normalmente este cálculo es en base a la distancia entre puntos pero en este caso se cambió por la distancia entre intensidades de grises. En el proceso de seguimiento dinámico de rasgos se agregaron los filtros morfológicos de erosión y dilatación para eliminar distractores (ver apartado 3.5.2 y 4.5.2).

Las pruebas realizadas hasta el momento con la base conformada por 18 videos (sección 5.2) incluye en su totalidad personas sin ningún trastorno en los movimientos oculares por lo que es importante aumentar la base de pruebas para contar con algunos videos de personas que presenten alguna anomalía en los movimientos oculares con la finalidad de poder probar los filtros y analizar los resultados.

En la sección 5.6 se puede observar gráficamente los datos que son relevantes para su posterior análisis por el módulo siguiente de este proyecto, estos gráficos además permiten hacer una idea de los movimientos oculares que se realizan dentro de cada video, si el especialista lo requiere puede tener acceso a ellos y extraer información en base a su experiencia. Se debe recordar que estos resultados no son los finales sin embargo si pueden aportar conocimiento importante.

---

Se debe recordar que esta implementación es para crear una herramienta de colaboración para los especialistas en salud visual con la finalidad de poder hacer exámenes visuales más precisos y exactos, esto repercutirá en mejores diagnósticos. Este sistema no sustituye el trabajo de los médicos, es una herramienta de colaboración.

## **6.2 Comentarios finales.**

El trabajo presentado sumerge inevitablemente en el extenso campo de la visión artificial, aplicar las técnicas estudiadas permite crecer el deseo de encontrar la mejor opción para los fines que se están buscando. Este trabajo aumenta el deseo de conocimiento en el área, ver el potencial de las técnicas que han sido desarrolladas hace ya muchos años sobre los dispositivos actuales, permite imaginar que es el momento de explotar todas las capacidades con las que un ser humano cuenta. Además aplicar este proyecto al área de la medicina es de lo más satisfactorio puesto que el beneficio puede ser sobre la gente directamente. Todo esto hace que la motivación de superación siga viva y en constante crecimiento.

## **6.3 Trabajo futuro.**

- Experimentar con otras opciones que mejoren ambos filtros, por la parte del filtro de partículas se puede aumentar el número de ellas, además de implementar el cálculo automático para la segmentación; por el lado del seguimiento dinámico de rasgos se probarán otros filtros previos al rastreo que pudieran dar el 100 % de efectividad, además se puede automatizar el recorte de las imágenes y los filtros de erosión y dilatación para que sean óptimos para cada caso.
- Aumentar el número de videos que conforman la base de pruebas para poder encontrar otros casos particulares que pudieran ser importantes.
- Se puede crear un filtro combinando los procesos del filtro de partículas y el seguimiento dinámico de rasgos.
- El proyecto final está formado por dos partes esenciales, el rastreo y la calibración, en un corto plazo se unirán las dos partes para formar la herramienta final de apoyo para los especialistas en salud visual.

---

***Anexo I - Carta de satisfacción del  
cliente***

Tlaxcala, Tlax. a 24 de enero de 2014

Asunto: Carta de satisfacción  
del cliente.

Mtro. Felipe Pascual Rosario Aguirre  
Director del Instituto Tecnológico de Apizaco  
PRESENTE

At' n: M. en C. Ma. Guadalupe Medina Barrera  
Jefa de la División de Estudios  
de Posgrado e Investigación.

Por este conducto le envió un cordial saludo y al mismo tiempo le informo que el **C. Lic. Salvador Medrano Romero**, con No. de control M06370518, estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales de la institución que usted dignamente dirige, me presentó su proyecto de tesis cuyo nombre es **"Rastreo dinámico para el seguimiento de las pupilas basado en técnicas de PDI con aplicación en la identificación de lesiones oculares sacádicas"**, esto con el objetivo de cumplir con el convenio realizado con la **"Óptica Santa María"**, y al revisar su trabajo, su aportación, su aplicación final y los resultados obtenidos puedo dar fe de que: **los objetivos estipulados al inicio del proyecto se alcanzaron satisfactoriamente y su aplicación cumple con el propósito de forma adecuada.**

A petición del interesado y para los fines legales que sean pertinentes, se extiende la presente a los veinticuatro días del mes de enero del año dos mil catorce.

ATENTAMENTE:



---

L. O. Marcelo Hernández Ramos.

Óptica Santa María.

---

## ***Anexo II – Estancia BUAP***



Oficio SIEPFCC/055/13.

**MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE  
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO  
PRESENTE**

Por medio de la presente y a la par de enviarle un cordial saludo, aprovecho la oportunidad de hacer de su conocimiento que el C.:

**Lic. Salvador Medrano Romero**

quien es estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Apizaco, Tlax., con No. De control M06370518, y que fue aceptado para realizar una Estancia Técnica en nuestra Benemérita Institución para apoyar la realización de su trabajo de Tesis de Maestría, co-asesorado por un servidor, ha cumplido con el periodo establecido para la citada Estancia, a saber, del 10 de Abril al 9 de Julio de 2013 y ha culminado exitosamente el plan de trabajo acordado con antelación y que forma parte de su trabajo de Tesis de Maestría.

A petición del interesado(a) y para los fines legales que estime pertinentes, se extiende la presente en la ciudad Heroica de Puebla de Zaragoza a los veintidós días del mes de agosto del año ~~dos mil trece~~.

ATENTAMENTE  
"PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR"  
H. Puebla de Z., a 29 de Agosto de 2013



**DR. LUIS CARLOS ALTAMIRANO ROBLES**  
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado

c.c.p.- Archivo.

---

## ***Anexo III – Artículo enviado a CIA***

## **Detección de trastornos en los movimientos sacádicos de la mirada mediante filtro de partículas.**

S. Medrano Romero, M. G. Medina Barrera, J. J. Hernández Mora, J. F. Ramírez Cruz.

**Resumen:** Actualmente existen numerosas enfermedades oculares que afectan a cualquier tipo de persona y esto es debido a que en nuestros tiempos el sentido de la vista es más explotado que en años anteriores, esto se atribuye a que la exigencia de lectura es mayor, los medios electrónicos con pantallas están casi en cualquier lugar y algunos otros factores como las condiciones climáticas o enfermedades hereditarias, con esto también incrementa la necesidad de herramientas que apoyen a los especialistas en enfermedades oculares a diagnosticar más eficientemente a sus pacientes. En este documento se presenta el desarrollo de una técnica llamada filtro de partículas, capaz de rastrear la pupila en una secuencia de video, con la finalidad de extraer información relevante para los médicos y poder mejorar significativamente los diagnósticos finales que son expedidos a los pacientes. En el presente artículo se muestra una forma eficiente de implementar un filtro de partículas enfocado en el rastreo de la pupila de una persona en un video, en el cual los movimientos oculares son controlados. Los resultados muestran que el seguimiento es eficaz para los objetivos buscados. Palabras Clave: enfermedades oculares, visión artificial, filtro de partículas.

**Abstract:** Currently there are numerous eye diseases that affect any person and this is because in our times the sense of sight is more exploited than in previous years, this is attributed to the reading requirement is higher, the electronic media with screens are almost everywhere and some other factors such as weather conditions or hereditary diseases, with this also increases the need for tools that support eye disease specialists diagnose their patients more efficiently. Artificial Vision provides the skills needed to perform a

filter, specifically a particulate filter, capable of tracking the pupil in a video sequence, in order to extract information relevant to clinicians and to improve significantly the final diagnoses that are issued patients. This paper shows an efficient way to implement a focused particle filter in tracking the pupil of a person in a video, in which eye movements are controlled. The results show that tracking is effective for the intended objectives.

Keywords: eye diseases, vision, particulate filter.

### **Introducción**

Las enfermedades oculares son un problema que se puede presentar en cualquier tipo de persona, nadie está exento de padecer algún tipo de lesión relacionada al sentido de la vista, la responsabilidad de los médicos especializados en la materia aumenta día a día debido al incremento de los factores que pueden llevar a una persona a requerir de sus servicios y es precisamente en ese momento que se presenta la necesidad de un diagnóstico oportuno que evite problemas mayores en el futuro. Específicamente hablar de los trastornos relacionados con los movimientos sacádicos es empezar a explorar un tema que afecta tanto a la gente común como a los especialistas que no cuentan con un sistema que analice a detalle dichos problemas, actualmente los estudios que realizan tanto los optometristas como los oftalmólogos están basados en la experiencia de cada uno de ellos y en ocasiones los diagnósticos finales podrían ser más exactos si se contara con herramientas que ayudaran a estos profesionales.

La necesidad de un sistema que abarque esas necesidades es importante ya que no es solo una región geográfica la que podría verse beneficiada sino todas aquellas en las que se detecten este tipo de requerimientos. El desarrollo tecnológico es un tema de actualidad y de crecimiento y puede ser aplicado a cualquier área como en este caso en la medicina.

Actualmente no se cuenta con una herramienta que proporcione medidas precisas de los movimientos oculares para poder estudiarlos y en un determinado momento determinar si existe un trastorno en el sentido visual, los especialistas en optometría tendrían un soporte al contar con una aplicación basada en técnicas

---

Salvador Medrano Romero  
Instituto Tecnológico de Apizaco.  
Reforma Nte. # 601 Huamantla, Tlax. México.  
2471048715  
María Guadalupe Medina Barrera  
Instituto Tecnológico de Apizaco.  
Tlaxcala, Tlax. México



de procesamiento digital de imágenes que analicen detalladamente el órgano visual humano mediante técnicas de mejora de imágenes y rastreo de la pupila de los pacientes en una escena de video, dando como resultado un diagnóstico preciso producto de la combinación de un análisis minucioso computarizado junto con la experiencia de los médicos.

**Enfermedades oculares.**

Las enfermedades relacionadas al sentido de la vista son muy variadas y pueden ir desde defectos en la mirada que pueden pasar imperceptibles hasta la pérdida de la vista.

Un tipo específico de trastorno visual es el relacionado a los movimientos sacádicos, que son movimientos rápidos que nuestros ojos realizan involuntariamente en el momento de fijar la atención en alguna escena. Estos movimientos nos permiten obtener mayor información visual en poco tiempo y optimizando los recursos del cuerpo, una actividad cotidiana en donde utilizamos este tipo de movimientos es en la lectura. La importancia de las sacadas de los ojos radica en que mediante ellas obtenemos la información visual que nos rodea, además estos movimientos son responsables de un enfoque adecuado de la vista y de una buena comprensión de la lectura. [1]

**Filtro de partículas.**

El filtro de partículas se introdujo originalmente en el área de la visión por computador como el algoritmo llamado “Condensation” y proporciona una forma simple y efectiva de modelar procesos estocásticos con funciones de densidad de probabilidad arbitrarias (no necesariamente normales o gaussianas) por aproximación numérica de estas [2]. Las partículas (muestras de la función de densidad a posteriori) son estados posibles del proceso que se pueden representar como puntos en el espacio de estados de dicho proceso. El filtro de partículas es un método secuencial aplicable a cualquier transición de estados o modelo de medida, y por consiguiente se puede utilizar en muchos campos al igual que el filtro de Kalman. El filtro de partículas supone una nueva manera de representar y generar recursivamente una aproximación del estado de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP). La idea central es representar la FDP requerida como un conjunto de muestras aleatorias. [3]

**Desarrollo.**

Para alcanzar el objetivo general del proyecto se lleva a cabo una metodología secuencial en la que se encuentran las siguientes fases:

1. Inicio de la captura del video de los ojos de una persona.
2. Conversión a escala de grises de los cuadros que conforman el video.
3. Obtención del rango de color de la pupila. Segmentación de la pupila.
4. Rastreo de la pupila durante la escena de video.

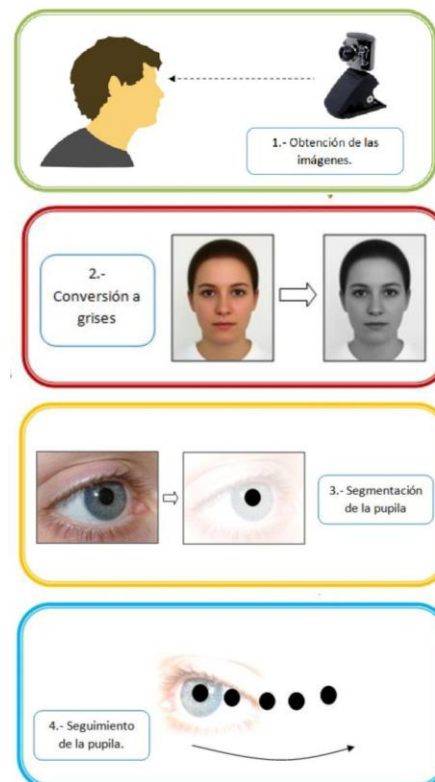


Fig. 1 Metodología propuesta.

**Captura del video.**

El primer paso de la metodología es iniciar una secuencia de video enfocado en los ojos de una persona, este proceso requiere de un modelo físico adecuado para la captura del video, en la figura siguiente se muestra un esquema del modelo propuesto:

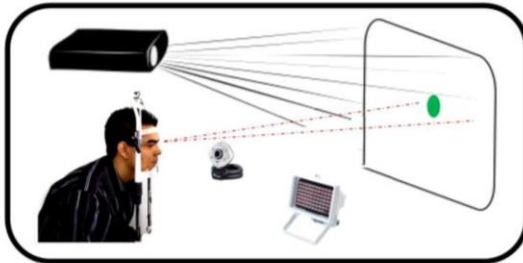


Fig. 2 Diagrama del prototipo físico.

Para el proceso de captura se utilizaron dispositivos con tecnología infrarroja, ya que las tomas obtenidas con ellos proporcionaban características más relevantes en comparación con dispositivos convencionales.

Los videos cuentan con las siguientes características necesarias para un buen procesamiento:

1. El rostro de las personas está fijo mediante una base ajustable al tamaño de la cara, que sostiene la barbilla y la frente.
2. Se utilizó un reflector de 77 leds infrarrojos como fuente de iluminación colocado estratégicamente de modo que el área de interés (la pupila) estuviera adecuadamente iluminada.
3. La distancia entre el rostro de las personas y la cámara infrarroja es estándar para todas las tomas (30 cm. aproximadamente).
4. Los movimientos oculares están controlados mediante la proyección de un objeto móvil sobre una superficie que se encuentra frente al paciente.

Las características de la cámara utilizada son:

- Marca: Genius.
- Modelo: eface 1325r.
- Cámara con filtro infrarrojo.
- Resolución: 1.3 Megapíxeles.
- Formato de video: MP4, JPEG y WMV.
- Velocidad: hasta 30 Fotogramas/segundo.
- Tamaño de fotograma: hasta 1280\*1024 píxeles.
- Conexión: USB.



Fig. 3 Cámara infrarroja utilizada.



Fig. 4 Imagen obtenida con la cámara infrarroja.

**Pre procesamiento de las imágenes (conversión a escala de grises).**

El video obtenido con la cámara infrarroja se procesa de manera que se pueda trabajar con cada frame que lo conforma. Cuadro a cuadro se llevan a cabo los pasos de conversión a escala de grises y rastreo hasta que el video termine.

El segundo paso de la metodología propuesta es la conversión de los cuadros que conforman el video en sus equivalentes en escala de grises. El cambio de una imagen a color a escala de grises, es un proceso sencillo que se obtiene promediando los valores RGB de la imagen original, es decir, sumando los tres valores de cada pixel y dividiéndolo entre 3.



Fig. 5 Imagen infrarroja (izquierda) y su equivalente en escala de grises (derecha).

**Segmentación de la pupila.**

El proceso de segmentación se llevó a cabo para poder extraer información de las regiones que iban a ser víctimas del rastreo, en este caso eran la zonas conformadas por las pupilas de los ojos.

El proceso de segmentación se lleva a cabo únicamente en la primer imagen de todo el conjunto de cuadros y su análisis sirve para tener características que son de utilidad en los pasos siguientes de la aplicación.

El método utilizado para realizar la segmentación es el crecimiento de regiones, ya que ofrece los mejores resultados respecto a otros algoritmos de segmentación (umbral, otsu e histograma).

Normalmente este proceso de segmentación, se inicia con uno o varios pixeles "semilla" para formar regiones determinadas, añadiendo aquellos pixeles vecinos que cumplan la propiedad específica (en este caso particular los que estén en el mismo rango de nivel de gris que los pixeles semilla). [4]

En las siguientes imágenes podemos observar el resultado de este proceso:

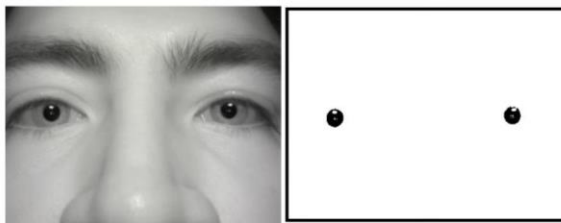


Fig. 6 Primer cuadro del video (izquierda) y resultado de la segmentación (derecha).

**Rastreo de la pupila.**

El filtro de partículas es el método utilizado para conseguir este rastreo y consta de 4 pasos principales, el primer paso llamado inicialización, dicho proceso solo se efectúa al principio del filtro y los otros tres pasos (actualización, estimación y predicción) se llevan a cabo cuadro a cuadro (se ciclan) hasta que la escena termine o el área rastreada desaparezca de las imágenes.

Para poder implementar el algoritmo de actualización es necesario un conjunto bien ponderado de partículas en el instante t con pesos iguales 1/N, y así actualizar este conjunto para reflejar las nuevas medidas obtenidas en el instante t+St. El algoritmo queda de la siguiente forma [3]:

1.- Propagar cada partícula m, en el tiempo utilizando el modelo de movimiento F del objeto para obtener un conjunto actualizado de partículas (1):

$$\{m_i^*\} \tag{1}$$

2.- Obtener un nuevo vector de medidas Z y evaluar la densidad de probabilidad a posterior  $\pi_i^*$  para cada  $m_i^*$ ,  $\pi_i^* = p(m_i^* | Z)$  que cuantifica la verosimilitud de (un estado)  $m_i^*$  dado un vector de medidas Z. Esto puede ser escrito usando la regla de Bayes (2):

$$\Pr(m_i^* | Z) = \frac{p(Z | m_i^*) p(m_i^*)}{p(Z)} \tag{2}$$

3.- Volver a muestrear a partir del conjunto  $\{m_i^*\}$  con probabilidades  $\pi_i^*$  y generar un nuevo conjunto bien ponderado  $\{m_i^*\}$  con pesos iguales (1/N) para cada partícula. El muestreo de cada partícula consiste en un estado, un peso y otra información posible (una covarianza por instante).

4.- Se repiten los pasos 1 y 3 para instantes sucesivos.

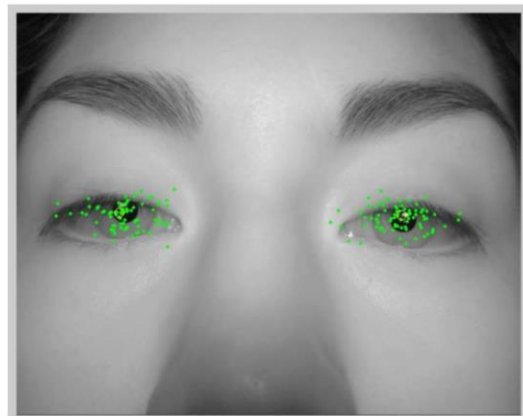


Fig. 7 Inicialización de las partículas aleatoriamente (puntos verdes) y obtención del pixel semilla (círculos amarillos).



Fig. 8 Corrida del filtro de partículas.

**Experimentación.**

El filtro desarrollado se sometió a pruebas para determinar su eficiencia. Se utilizaron 10 videos de diferentes pacientes. La duración de los videos es diferente entre cada uno, sin embargo esto no es un factor que afecte las pruebas ya que por cada video se extraen 5 cuadros por segundo de toda su duración, las condiciones de luz para la toma de las escenas fue únicamente con iluminación infrarroja, en algunas tomas las personas tienen ojos claros, la mayoría cuenta con ojos en tonalidad oscura, dos personas tienen rímel y el grosor y largo de las pestañas varía entre cada individuo.



Fig. 9 Algunas imágenes de prueba. Ojos claros (izquierda arriba), ojos con rímel (derecha arriba), ojos oscuros (izquierda abajo) y ojos cerrados (derecha abajo).

Durante los videos se pueden observar diferentes movimientos oculares por ejemplo:

- Vista al centro
- Vista hacia arriba y a los lados
- Vista hacia abajo y a los lados
- Movimientos de un lado a otro
- Movimientos de arriba hacia abajo
- Movimientos en círculos

Además existen parpadeos dentro de las escenas, ya que son movimientos involuntarios de los ojos que no deben de afectar el funcionamiento del filtro.

Todos estos distintos movimientos son comúnmente analizados por los especialistas con métodos tradicionales llamados de exploración (test de Hirshberg, test de Krinsky, test de Irvine, test de Hess y test de Bleischowsky) y por tanto no existen resultados exactos producto de estos estudios.

La tabla 1 muestra las características de cada video sometido al filtro:

**Tabla 1:** Características de los videos

	Edad (años)	Duración	Cuadros	Observaciones
Video 1	4	58 seg	290	Ojos oscuros
Video 2	7	1 min 8 seg	340	Ojos claros
Video 3	8	44 seg	220	Ojos claros
Video 4	16	1 min 13 seg	365	Ojos oscuros
Video 5	18	51 seg	255	Ojos oscuros con rímel
Video 6	19	1 min 17 seg	385	Ojos oscuros
Video 7	22	57 seg	285	Ojos claros
Video 8	23	57 seg	285	Ojos oscuros
Video 9	25	1 min 6 seg	330	Ojos oscuros
Video 10	34	57 seg	285	Ojos oscuros

Para probar la efectividad del filtro se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- El objetivo del filtro es rastrear las pupilas durante todo el tiempo de los videos, es decir no perder la atención sobre esas áreas.
- 2.- La efectividad disminuye cuando existe un movimiento ocular y este no es rastreado por el filtro. Todos los movimientos oculares de los pacientes son controlados por una animación digital que está visible frente a cada individuo.
- 3.- Existe cierre de los ojos, en ese movimiento la pupila deja de ser visible para el filtro, sin embargo, cuando el ojo vuelve a abrirse el centro de atención es

recuperado, esto se debe a que no hay un movimiento brusco de la pupila respecto a un cuadro y el siguiente.

4.- En algunos cuadros las pestañas de los pacientes se ven sobre la pupila, no obstante el filtro encuentra con efectividad el área de interés ya que con la iluminación infrarroja las pestañas se ven de tonalidad más clara de lo que son en realidad y el tono de las pupilas es bien distinguible a través de las pestañas.

A continuación se muestran algunos casos particulares de los videos y la respuesta del filtro:

**Ojos oscuros.** El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. Existe cierre de ojos pero no pérdida del centro de atención.



Fig. 10 Filtro de partículas sobre ojos oscuros.

**Ojos claros.** El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. Existe cierre de ojos pero no pérdida del centro de atención.

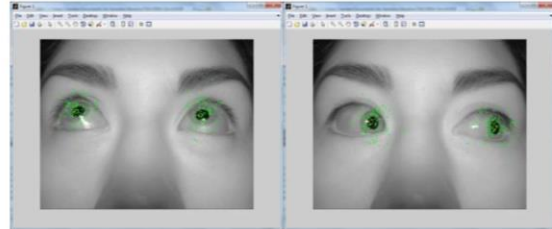
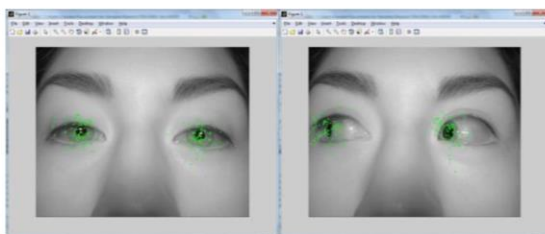


Fig. 11 Filtro de partículas sobre ojos claros.

**Ojos cerrados.** El filtro encuentra nuevamente el centro de atención cuando el ojo se abre. No hay pérdida de ningún movimiento ocular.

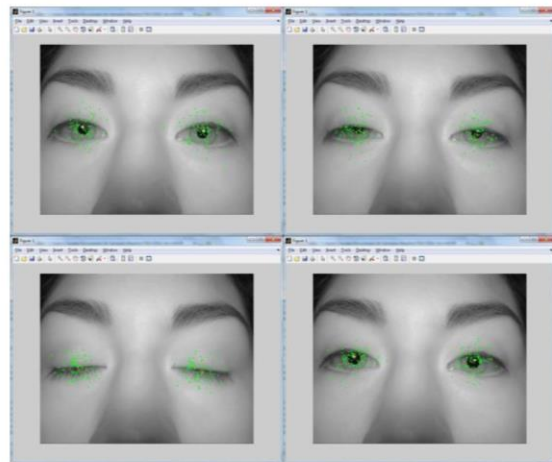
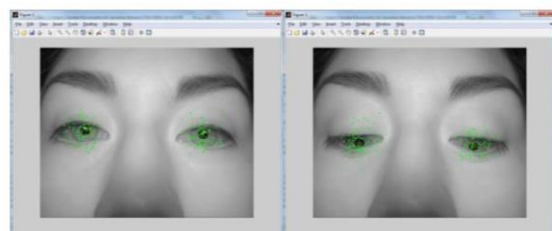


Fig. 12 Filtro de partículas sobre ojo cerrado.

**Vista hacia abajo.** El filtro rastrea la pupila con un 100% de efectividad. No hay pérdida de ningún movimiento ocular. Existe cierre parcial de ojos pero no pérdida del centro de atención.



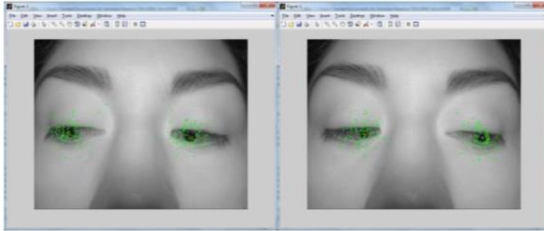


Fig. 13 Filtro de partículas sobre ojo parcialmente cerrado.

### Resultados.

El filtro de partículas fue probado con una base de videos conformado por 10 elementos: 3 de niños entre 4 y 8 años, 6 de jóvenes entre 16 y 25 años y 1 de un adulto.

Los videos tienen diferentes características de acuerdo a la persona que fue filmada por ejemplo pestañas con rímel, párpados maquillados, ojos de color claro, ojos oscuros y pestañas risadas, estas características generan ruido al procesar los cuadros del video sin embargo aún así se logra el objetivo de no perder el rastro de la pupila.

La duración de cada video varía según el número de movimientos oculares que se registren.

#### Videos de niños (entre 4 y 8 años de edad).

Número de movimientos oculares perdidos: 0.

Efectividad: **100%**.

Existen cuadros en donde hay cierre total o parcial de los ojos, el tono de las pupilas es diferente entre cada persona.

#### Videos de jóvenes (entre 16 y 25 años de edad).

Número de movimientos oculares perdidos: 0.

Efectividad: **100%**.

Existen cuadros en donde hay cierre total o parcial de los ojos, el tono de las pupilas es diferente entre cada persona.

#### Videos de adultos (44 años de edad).

Número de movimientos oculares perdidos: 0.

Efectividad: **100%**.

Existen cuadros en donde hay cierre total o parcial de los ojos, el tono de las pupilas es diferente entre cada persona.

### Conclusiones

El filtro de partículas es un método sencillo que da resultados 100% efectivos en el rastreo de objetos, siempre y cuando las condiciones sobre las cuales se trabaja sean óptimas.

El proyecto alcanza el objetivo principal que es rastrear la pupila sin perder ningún movimiento significativo de la mirada, esto se logra gracias a la combinación del algoritmo y el prototipo físico diseñado propiamente para estas pruebas.

El proceso es un tanto robusto debido a que 3 de los 4 pasos del algoritmo se llevan a cabo cuadro por cuadro durante todo el transcurso de la secuencia de video.

Dentro de los videos existen escenas donde los ojos se cierran parcial o totalmente, esto no es una condición para el correcto funcionamiento del filtro, como ya se mencionó anteriormente, el filtro es capaz de recuperar el centro de atención cuando en algunos cuadros desaparece por completo, esto se debe a la cantidad de cuadros que se extrae por segundo ya que al ser un número adecuado (5/s) no existen movimientos drásticos de las pupilas entre un cuadro y el siguiente.

Las características físicas de cada persona tampoco son una limitante para el filtro, si bien el rastreo puede mejorar o empeorar con algunas (principalmente el maquillaje) no reducen la efectividad del programa.

Utilizar dispositivos infrarrojos minimiza los requerimientos del filtro de partículas ya que las tomas que se obtienen con ellos cuentan con rasgos que favorecen al procesamiento óptimo.

Este artículo muestra un método para rastrear una zona de interés en una secuencia de imágenes con resultados óptimos, el objetivo de este proyecto es unirlo a otros para conformar un sistema de apoyo a médicos especialistas en la vista para detectar lesiones relacionadas específicamente a los movimientos oculares sacádicos, ya que es una aplicación que actualmente no existe.

### Trabajo futuro.

Desarrollar un filtro nuevo (Kalman) con la intención de hacer una comparación de resultados con el filtro de partículas. Actualmente existen algoritmos ya desarrollados sin embargo debido a las condiciones particulares y al objetivo buscado lo más conveniente es desarrollar un método adaptado a estas condiciones.

Aumentar la base de videos para comprobar que el filtro funciona adecuadamente sobre cualquier tipo de persona.

Unir los proyectos que den como resultado la aplicación final para los médicos.

**Referencias**

- [1] L. Gila, A. Villanueva, R. Cabeza, “Fisiopatología y técnicas de registros de los movimientos oculares” en An. Sist. Sanit. Navar. Suplemento 3, pp. 9 – 26, 2009.
- [2] J. Yáñez García, “Tracking de personas a partir de visión artificial”. Madrid España, 2010
- [3] E. Burgueños Raigal, “Aplicación del filtro de partículas al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes”. España, 2003.
- [4] “Curso Procesamiento de imágenes digitales”, Universidad de Sevilla.

**Currículos.**

Salvador Medrano Romero. Licenciado en informática egresado del Instituto Tecnológico de Apizaco en el año 2011.

Ma. Guadalupe Medina Barrera. Licenciada en informática egresada del Instituto Tecnológico de Tepic. Maestra en Ciencias en Ciencias Computacionales por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

J. Juan Hernández Mora. Ingeniero en computación por la Universidad Autónoma de Tlaxcala. Maestro en Ciencias en Ciencias Computacionales por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

J. Federico Ramírez Cruz. Doctor en Ciencias con especialidad en ciencias computacionales por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.



# El Tecnológico de Misantla

Otorga el presente

# Reconocimiento

## Al C. Salvador Medrano Romero

Por impartir la Ponencia

## Rastreo de la Pupila Mediante Filtro de Partículas

Realizado el 3 de mayo de 2013

En el marco del Congreso Internacional de Informática Aplicada



“Excelencia académica  
para un futuro de calidad”



DIRECCION  
3-JUEIT0002T — Director General del ITSM

Misantla, Veracruz, México., Mayo de 2013.



---

***Anexo IV – Artículo enviado a ROC&C***

## Resultados comparativos en la aplicación de filtros para el rastreo de pupilas como herramientas de apoyo en el análisis de datos requeridos para el diagnóstico de lesiones oculares.

Salvador Medrano Romero<sup>1</sup>, María Guadalupe Medina Barrera<sup>1</sup>, José Juan Hernández Mora<sup>1</sup>, José Federico Ramírez Cruz<sup>1</sup> y Luis Carlos Altamirano Robles<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Apizaco, Tlaxcala, México. C. P. 90300

<sup>2</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. C. P. 72000

**Resumen:** Hoy en día contamos con herramientas computacionales que pueden ser aplicadas a diferentes sectores con la finalidad de resolver problemas o apoyar en la solución de ellos. Dentro del campo de salud visual se ha detectado la necesidad de un sistema que renueve la forma en que se llevan a cabo la mayoría de los exámenes médicos. Los especialistas en esta área realizan muchas pruebas a sus pacientes para determinar si existen enfermedades oculares y en qué grado, pero la mayoría de esos estudios los llevan a cabo de forma manual y sus respectivos diagnósticos son elaborados en base a la experiencia del médico. En este artículo se proponen dos filtros basados en técnicas de visión artificial para el rastreo de las pupilas. El filtro de partículas y el seguimiento dinámico de rasgos (SDR) cuya aplicación tienen como finalidad proporcionar una herramienta computacional que permita obtener datos relevantes para los estudios médicos correspondientes y poder ofrecer diagnósticos y resultados más precisos y detallados, estos datos incluyen: el número de movimientos oculares analizados y las coordenadas de las posiciones de las pupilas correspondientes a cada movimiento.

**Palabras Clave:** Visión artificial, rastreo, filtro de partículas, Seguimiento dinámico de rasgos.

**Abstract:** Today we have computational tools that can be applied to different sectors in order to solve problems or support in solving them. Within the field of eye health has identified the need for a system to renew the way they are conducted most medical tests. Specialists in this area perform many tests to their patients to determine if there are eye diseases and to what degree, but most of these studies are carried out manually and their diagnoses are made based on the

experience of the doctor. In this paper, we propose two filters based on artificial vision techniques for tracking pupils. The particle filter and dynamic tracking features whose implementation are intended to provide a computational tool to obtain relevant data for medical studies and offer diagnoses and results more accurate and detailed, these data include: the number of eye movements analyzed and the coordinates of the positions of the pupils for each movement.

**Key Words:** Artificial vision, tracking, particles filter, features dynamic tracking.

### Introducción

Las enfermedades oculares están presentes en mayor porcentaje en la actualidad en comparación a años anteriores, esto se atribuye a factores como el aumento en el hábito de la lectura, el aumento en el uso de distintos tipos de dispositivos electrónicos que cuentan con pantallas digitales tales como celulares, computadoras, tabletas, reproductores y muchos electrodomésticos que ahora cuentan con estas tecnologías, además los cambios climáticos que siempre están presentes y en aumento. Todos estos factores aumentan la posibilidad de desarrollar una enfermedad ocular en menor o mayor grado, y es de gran importancia poder detectar estas anomalías de forma efectiva y precisa.

Los movimientos oculares que pueden verse afectados son: de fijación, de seguimiento y sacádicos, la alteración de alguno de ellos puede provocar pérdida del campo de visión, pérdida de la atención, visión borrosa, mala lectura y dificultad para enfocar.

En general en todas las clínicas especialistas en salud ocular comparten los mismos métodos para examinar a sus pacientes, estos métodos están basados en técnicas convencionales y la mayoría se lleva a cabo de forma manual, además los diagnósticos que proporcionan a sus pacientes son generados en base al nivel de experiencia con que cuenta el médico.

La visión artificial proporciona técnicas como el filtro de partículas y el SDR que permiten el desarrollo de una herramienta que colabore con los médicos para obtener pruebas, diagnósticos más exactos, precisos y detallados de sus pacientes.

### Rastreo de objetos.

Dentro de las aplicaciones de la visión artificial se encuentra el rastreo de objetos (tracking) dentro de una secuencia de imágenes (video).

El rastreo tiene distintos objetivos de acuerdo a la aplicación en que se implemente. Sin embargo el objetivo principal es mantener la atención en un objeto determinado durante toda la duración de la secuencia de imágenes o hasta que el objeto desaparezca de dicha secuencia.

Existen distintos algoritmos que permiten realizar el rastreo y la elección de uno u otro depende de las características y necesidades del motivo de implementación.

### Filtro de partículas.

El filtro de partículas es un método empleado para estimar el estado de un sistema que cambia a lo largo del tiempo. Fue propuesto en 1993 por N. Gordon, D. Salmond y A. Smith como filtro bootstrap para implementar filtros bayesianos recursivos mediante el método de Monte Carlo. Este algoritmo es también conocido como SIS (Sequential Importance Sampling) o algoritmo Condensation. [1]

**Seguimiento dinámico de rasgos (SDR).** El fundamento del SDR es la reducción de la complejidad funcional cuando se siguen rasgos sobresalientes del objeto, en vez de la región continua del objeto o sus contornos. Por tanto trabajan el reconocimiento y seguimiento de objetos a través de la extracción de elementos, agrupándolos en el más alto nivel de rasgos y luego haciendo un “matching” entre imágenes. Se utilizan como rasgos parámetros como las esquinas, la información del color y la textura. En el SDR los rasgos son determinados y seguidos dinámicamente sobre frames consecutivos, estimando movimiento del rasgo y buscándole en el próximo frame. [2]

### Metodología.

Para la correcta implementación de los dos filtros de rastreo se llevan a cabo algunos pasos previos para ambos, sin embargo cada uno tiene procesos particulares por lo que la metodología está formada descendentemente como se muestra en la **Figura 1**:

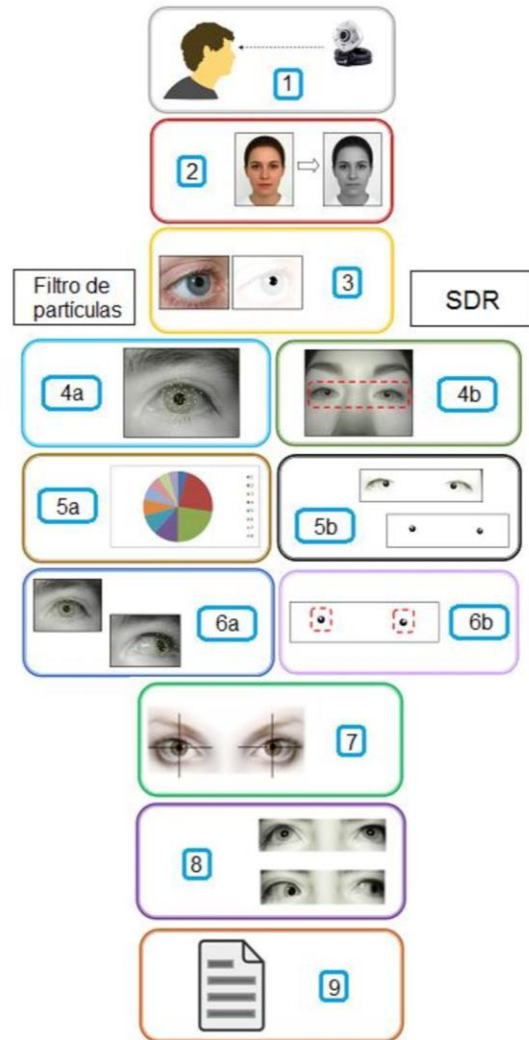


Fig. 1 Metodología.

En la metodología propuesta para el desarrollo de los dos filtros de rastreo, los tres primeros pasos se repiten para ambos (1 obtención de las secuencias de imágenes, 2 conversión de los cuadros a escala de grises y 3 segmentación de las pupilas), así como los tres últimos (7 determinación de la posición de las pupilas en coordenadas, 8 registro de los movimientos oculares y 9 generación de archivo de texto con los datos relevantes), sin embargo los pasos intermedios son diferentes para cada filtro; para el caso del filtro de partículas se tiene: 4a generación aleatoria de partículas, 5a cálculo del peso de cada partícula y 6a generación de nuevas partículas en base a su peso, por otra parte para el SDR se tiene: 4b determinación de la

zona de búsqueda, 5b eliminación de distractores y 6b rastreo del patrón o zona de interés.

### Desarrollo.

**Obtención de las secuencias de imágenes.** Con la finalidad de obtener las mejores tomas de los ojos de los pacientes se optó por utilizar iluminación infrarroja y una cámara especial para ese tipo de luz. En la **Figura 2** se puede observar el prototipo físico de captura:

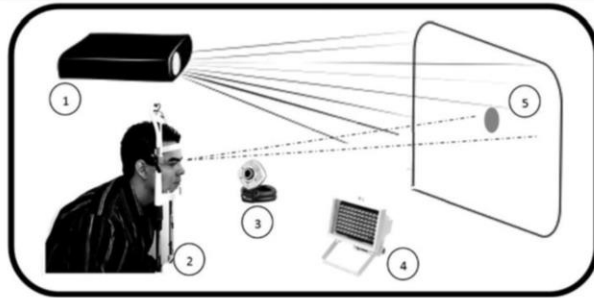


Fig. 2 Prototipo físico

En donde: 1 Proyector que reproduce la animación controlada, 2 base del mentón para evitar los movimientos del rostro, 3 webcam infrarroja, 4 iluminación infrarroja y 5 animación reflejada en una superficie frente a la persona.

Dentro de las características relevantes de este prototipo están: el rostro de las personas está fijo mediante una base ajustable al tamaño de la cara que sostiene la barbilla y la frente, se utilizó un reflector de 77 leds infrarrojos como fuente de iluminación colocado estratégicamente de modo que el área de interés (las pupilas) estuvieran adecuadamente iluminadas, la distancia entre el rostro de las personas y la cámara infrarroja es estándar para todas las tomas (30 cm. aproximadamente), los movimientos oculares están controlados mediante la proyección de un objeto móvil sobre una superficie que se encuentra frente al paciente.

**Conversión a escala de grises.** Las imágenes obtenidas en el primer paso de la metodología pasan por un primer filtro que es la conversión a su equivalente en escala de grises, el objetivo es contar con imágenes más fáciles de procesar. La forma más simple para obtener las imágenes en tonalidades grises es combinar los tres canales originales de la imagen (r, g, b rojo, verde y azul por sus siglas en inglés) en uno solo, se utiliza un promedio de los 3 canales de cada pixel para encontrar el correspondiente en grises (1):

$$(R + G + B) / 3 \quad (1)$$

**Segmentación de las pupilas.** La segmentación es el proceso de separar el área o áreas de interés del resto de las imágenes. Para este proyecto este proceso tiene dos finalidades diferentes. En el primer filtro de rastreo que se implementó (filtro de partículas), la segmentación se realiza con el objetivo de extraer alguna característica importante de las pupilas que posteriormente permita rastrearlas, por lo que se optó por utilizar el método de crecimiento de regiones.

El crecimiento de regiones es una operación que divide una imagen en regiones bien delimitadas, evitando que exista superposición en ellas. Una región es un conjunto de pixeles que son adyacentes, que siguen ciertas reglas de conectividad y que en general se definen entre los cuatro o los ocho vecinos más cercanos. Comúnmente se emplea la conectividad con los ocho vecinos más cercanos, ya que ésta se aproxima bien a la clasificación intuitiva que los seres humanos efectúan cotidianamente. [3]

Para el segundo filtro implementado (seguimiento de rasgos dinámico) se utilizó la segmentación por umbral ya que el objetivo de este proceso no es el mismo al del primer filtro de rastreo, en este caso solo se necesita conocer cuáles son las posiciones de las zonas de interés (las pupilas) para empezar el rastreo.

La umbralización se lleva a cabo normalmente en imágenes en escala de grises y el objetivo es generar una nueva imagen con solo dos tonalidades (blanco y negro) en las que se pueda diferenciar los objetos y el fondo de la imagen. (2)

$$\text{Pixel}(x, y) > \text{umbral} \quad (2)$$

**Filtro de partículas.** El filtro de partículas es un modelo de estimación, utilizado en la visión por computador para realizar seguimiento de objetos, es también conocido como Método Secuencial de Montecarlo o Condensation. El filtro de partículas realiza la estimación de una variable (o más) a lo largo del tiempo, en cada estimación usa como entrada el valor de dicha variable en el instante anterior y la observación de la información. [4]

La ecuación (3) muestra matemáticamente al filtro de partículas:

$$P(x_t | z_{0:t}) = \alpha P(z_t | x_t) \int P(x_{t-1} | z_{0:t-1}) P(x_t | x_{t-1}) dx_{t-1} \quad (3)$$

La probabilidad de que se dé el estado  $x$  en el instante  $t$ , dadas las observaciones  $z$  desde el instante 0 al instante  $t$ , se puede definir de forma recursiva como la probabilidad de que se obtenga la situación  $z$ , en el estado  $x$  (función de evaluación), multiplicado por la

probabilidad de que esté en el estado  $x$ . La probabilidad que este en el estado  $x$  se obtiene como la integral de la probabilidad que estuviese en otra estado  $y$  y se haya pasado al estado  $x$ .

El filtro consta de 4 etapas inicialización, actualización, estimación y predicción. El primer paso se lleva a cabo únicamente una vez y los 3 restantes se repiten durante todo el tiempo de duración de la secuencia de imágenes.

En el paso de inicialización se genera un número aleatorio de partículas, cada una con un par de coordenadas. En la **Figura 3** se observa el primer paso.



Fig. 3 Inicialización de las partículas.

Posteriormente para los 3 pasos restantes se aplica el siguiente algoritmo: propagar cada partícula  $m_i$  en el tiempo utilizando el modelo de movimiento  $F$  del objeto para obtener un conjunto actualizado de partículas (4):

$$\{m_i^*\} \quad (4)$$

Obtener un nuevo vector de medidas  $Z$  y evaluar la densidad de probabilidad a posterior  $\pi_i^*$  para cada  $m_i^*$ ,  $\pi_i^* = p(m_i^* | Z)$  que cuantifica la verosimilitud de (un estado)  $m_i^*$  dado un vector de medidas  $Z$ . Esto puede ser escrito usando la regla de Bayes (5):

$$\Pr(m_i^* | Z) = \frac{p(Z | m_i^*)p(m_i^*)}{p(Z)} \quad (5)$$

Volver a muestrear a partir del conjunto  $\{m_i^*\}$  con probabilidades  $\pi_i^*$  y generar un nuevo conjunto bien ponderado  $\{m_i^*\}$  con pesos iguales ( $1/N$ ) para cada partícula. El muestreo de cada partícula consiste en un estado, un peso y otra información posible (una covarianza por instante). En la **Figura 4** se observa una muestra del Filtro de partículas.



Fig. 4 Muestra del filtro de partículas.

**Seguimiento dinámico de rasgos (SDR).** El SDR se enfoca en encontrar un patrón de interés durante una secuencia de imágenes. Para este proyecto se toman en cuenta dos patrones que son las pupilas de los pacientes. Este método se divide en las siguientes etapas: determinar la zona de búsqueda, segmentar la zona de búsqueda, eliminar distractores mediante los filtros de erosión y dilatación y encontrar el patrón de interés.

Determinar la zona de búsqueda es delimitar el área en donde se van a buscar los patrones de interés. El prototipo físico cuenta con una base que mantiene fijo el rostro de los pacientes durante la toma de los videos y esto favorece a que no existan movimientos del rostro sino únicamente movimientos oculares, es decir que los ojos respecto al rostro siempre se encuentran en la misma posición y solo se registran movimientos de las pupilas. Esto permite delimitar la zona en donde es posible encontrar los patrones de interés.

Una vez encontrada la zona de búsqueda se procede a segmentar las áreas de interés por el método de umbralización automática. El objetivo es encontrar los patrones de interés dentro de esa zona. Cabe mencionar que ya que todas las personas son diferentes puede ser que un umbral definido no funcione adecuadamente para todos los casos por lo que el umbral se calcula automáticamente dependiendo de las características de cada secuencia de imágenes.

El resultado de la segmentación no siempre proporciona un resultado final óptimo, en ocasiones pueden aparecer áreas que no pertenecen a los patrones de interés, por lo que se deben eliminar. Esto se logra mediante la aplicación de dos filtros: erosión y dilatación que combinados eliminan las zonas que no son de interés dejando limpias las pupilas.

La dilatación se define por (6):

$$A \oplus B = \{x \text{ tal que } (\hat{B})_x \cap A \neq \emptyset\} \quad (6)$$

Mientras que la erosión está dada por (7):

$$A \ominus B = \{x \text{ tal que } B_x \subseteq A\} \quad (7)$$

Este proceso se puede observar en la **Figura 5**:

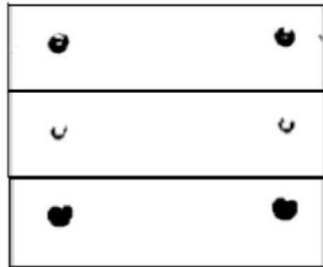


Fig. 5 Imagen segmentada (arriba), erosionada (en medio) y dilatada (abajo).

Terminado el paso anterior se obtiene una imagen en donde solo aparecen los patrones de interés. El último paso es encontrar las posiciones de las áreas resultantes para que en los cuadros posteriores se realice la búsqueda cerca de dichas zonas.

Todos estos pasos se repiten en cuadros sucesivos. Cuando aparecen cuadros en donde los ojos se cierran totalmente se procede a delimitar nuevamente las áreas de búsqueda y los pasos posteriores se repiten nuevamente. Una muestra de este método se puede observar en la **Figura 6**.



Fig. 6 Muestra del SDR.

Durante la ejecución de ambos filtros se envían las coordenadas de las pupilas a un documento de texto, así como los movimientos a los que corresponden cada par de coordenadas, esto se hace por cada cuadro que

conforma a la secuencia con la finalidad de poder analizar estos datos posteriormente.

**Experimentación.** Para realizar las pruebas necesarias y determinar la eficiencia de los filtros se utilizó una base conformada por 18 videos de distintas personas, de diferentes edades, hombres y mujeres y con diferente tono de color de ojos. Las edades van desde los 4 hasta los 44 años de edad. La duración de los videos es variante puesto que los movimientos oculares registrados son distintos. Se realizaron distintas pruebas con un número diferente de cuadros extraídos por minuto de cada video, sin embargo el análisis se hace tomando de base 20 cuadros por segundo. Los casos particulares se muestran a continuación.

**Resultados.** Los resultados generales muestran una eficiencia del 89 % para el filtro de partículas y un 99 % para el SDR. Los resultados se pueden ver más detallados en la **Tabla 1**.

Ambos filtros son efectivos para llevar a cabo el rastreo, el filtro de partículas está apenas por debajo del 90% de efectividad mientras que el SDR tiene un 99%. La principal desventaja del filtro de partículas frente al SDR, es cuando se presentan casos en donde las personas que se someten a las pruebas tienen rímel en las pestañas, esta característica hace que las pestañas adquieran un color más oscuro acercándose mucho al tono de las pupilas por lo que cuando existe cierre de los ojos el filtro de partículas no deja de buscar las zonas de interés y llega a confundirse con las pestañas, cuando las pupilas vuelven a aparecer existe la posibilidad de que se recupere el centro de atención o en el peor de los casos que no pueda volver a identificarlo y las partículas se generan alrededor de las pestañas hasta que finaliza la secuencia de imágenes. El SDR tiene la característica de identificar cuando desaparecen las pupilas y de ser así durante los cuadros siguientes repite todos los pasos que conforman al filtro, por lo que es hasta que las pupilas reaparecen que empieza nuevamente a rastrearlas.

Tabla 1. Comparativa de errores y aciertos.

Tabla comparativa de errores y aciertos						
No. Video	Falsos positivos		Falsos negativos		% Efectividad	
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2
1	0	18	21	0	97.08333333	97.5
2	0	0	235	0	79.01785714	100
3	0	11	12	0	98.7755102	98.877551
4	*	0	-	0	-	100
5	0	14	7	0	99.375	98.75
6	0	23	16	0	98.51851852	97.8703704
7	0	0	145	0	83.88888889	100
8	0	0	8	0	99.2	100
9	0	6	3	0	99.7	99.4
10	0	12	16	0	98.29787234	98.7234043
11	*	0	-	0	-	100
12	0	0	24	0	97.77777778	100
13	0	18	261	0	80.52238806	98.6567164
14	0	12	12	0	98.82352941	98.8235294
15	0	18	7	0	99.42622951	98.5245902
16	0	8	6	0	99.375	99.1666667
17	0	13	15	0	98.828125	98.984375
18	0	27	152	0	86.89655172	97.6724138

**Conclusiones.** Ambos filtros implementados presentan una eficiencia excelente para realizar el rastreo, siempre y cuando las condiciones sean óptimas, se habla de secuencias de imágenes en donde las zonas que se pretende rastrear siempre están presentes. Esta es una limitación para el filtro de partículas, ya que para las características de la problemática se requiere de un programa que sea capaz de responder satisfactoriamente a problemas como la desaparición momentánea de las zonas de interés. Este problema puede ser corregido aumentando el número de partículas sin embargo esto haría más lento el procesamiento.

El filtro de seguimiento de rasgos dinámico es 99 % efectivo, aún en casos en donde las pupilas desaparecen por completo de las secuencias de imágenes, esto es gracias a su forma consecutiva de procesamiento y una de sus ventajas es que al reducir la zona de búsqueda desde el inicio el procesamiento se vuelve más rápido en comparación al buscar en las imágenes completas.

La velocidad entre los filtros es en general rápida ya que en los videos más largos de aproximadamente 1220 cuadros/seg. se registró un tiempo máximo de 4 segundos en total de procesamiento, este tiempo es arrojado por el filtro de partículas mientras que por el otro método se obtiene una velocidad de 1 segundo, por lo que se puede concluir que el seguimiento de rasgos dinámico es 3 veces más rápido que el filtro de partículas.

Se debe recordar que esta implementación es para crear una herramienta de colaboración para los especialistas en salud visual con la finalidad de poder hacer exámenes visuales más precisos y exactos, esto repercutirá en mejores diagnósticos. Este sistema no sustituye el trabajo de los médicos, es una herramienta de colaboración.

**Trabajo futuro.** Experimentar con otras opciones que mejoren ambos filtros, por la parte del filtro de partículas se puede aumentar el número de ellas, además de implementar el cálculo automático de la densidad de probabilidad; por el lado del seguimiento

de rasgos dinámico se probarán otros filtros previos al rastreo que pudieran dar el 100 % de efectividad.

Aumentar el número de videos que conforman la base de pruebas para poder encontrar otros casos particulares que pudieran ser importantes.

El proyecto final está formado por dos partes esenciales, el rastreo y la calibración, en un corto plazo se unirán las dos partes para formar la herramienta final de apoyo para los especialistas en salud visual.

## Referencias

- [1] A. Rodríguez Moya, "Estudio del filtro de partículas aplicado al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes", España, 2009.
- [2] W. Izquierdo Guerra, C. E. García Reyes, "Seguimiento y conteo de personas en ambientes exteriores con una cámara fija", La Habana, Cuba, 2009.
- [3] J. M. Buades Rubio, "Filtro de partículas, Condensation", Palma de Mallorca, España.

## Currículo corto de los autores



Salvador Medrano Romero.  
Licenciado en informática  
egresado del Instituto Tecnológico  
de Apizaco.



Ma. Guadalupe Medina Barrera.  
Maestra en Ciencias en Ciencias  
Computacionales por el Centro  
Nacional de Investigación y  
Desarrollo Tecnológico.  
Investigadora de la Maestría en  
Sistemas Computacionales del

Instituto Tecnológico de Apizaco y miembro del cuerpo académico PROMEP "Sistemas de información".



J. Juan Hernández Mora. Ingeniero  
en computación por la Universidad  
Autónoma de Tlaxcala. Maestro en  
Ciencias en Ciencias  
Computacionales por el Centro  
Nacional de Investigación y  
Desarrollo Tecnológico.



J. Federico Ramírez Cruz. Doctor  
en Ciencias con especialidad en  
ciencias computacionales por el

---

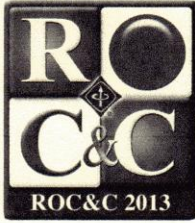
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.



Luis Carlos Altamirano Robles. Recibió su doctorado en el Instituto Politécnico Nacional en 2002. Sus áreas de interés incluyen: Visión por computador, procesamiento de imágenes, teledetección e Inteligencia Artificial. Actualmente es profesor

de tiempo completo en el Departamento de Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Puebla y jefe del Departamento de Postgrado de la misma Institución.





OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

A

*Salvador Medrano Romero*

POR SU AMABILISIMA PARTICIPACION EN LA:

**Vigésimacuarta Reunión Internacional de Otoño, de  
Comunicaciones, Computación, Electrónica, Automatización,  
Robótica y Exposición Industrial**

**LA CONFLUENCIA DE LAS TECNOLOGIAS EN  
COMPUTACION, ENERGIA Y COMUNICACIONES  
PARA REDES INTELIGENTES**

CON LA PONENTIA:

**RESULTADOS COMPARATIVOS EN LA APLICACION DE FILTROS  
PARA EL RASTREO DE PUPILAS COMO HERRAMIENTAS DE APOYO EN  
EL ANALISIS DE DATOS REQUERIDOS PARA EL DIAGNOSTICO  
DE LESIONES OCULARES**

**ING. JUAN BAUTISTA FLORES**

PRESIDENTE IEEE SECCION MEXICO

10 AL 14 DE NOVIEMBRE 2013, ACAPULCO, GUERRERO

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.**

---

***Anexo V – Artículo enviado a la  
Revista SIPIJ***

## IMPLEMENTATION OF FEATURES DYNAMIC TRACKING FILTER TO TRACING PUPILS

Salvador Medrano<sup>1</sup>, Ma. Guadalupe Medina<sup>1</sup>, J. Juan Hernández<sup>1</sup> and L. Carlos Altamirano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master of computer systems, Technological Institute of Apizaco, Tlaxcala, México

<sup>2</sup>Department of computer science, Autonomous University of Puebla, Puebla, México

### **ABSTRACT**

*The objective of this paper is to show the implementation of an artificial vision filter capable of tracking the pupils of a person in a video sequence. There are several algorithms that can achieve this objective, for this case, features dynamic tracking selected, which is a method that traces patterns between each frame that form a video scene, this type of processing offers the advantage of eliminating the problems of occlusion patterns of interest. The implementation was tested on a base of videos of people with different physical characteristics of the eyes. An additional goal is to obtain information of the eye movements that are captured and pupil coordinates for each of these movements. These data could help some studies related to eye health.*

### **KEYWORDS**

*Artificial vision, tracking, dynamic tracking features.*

### **1. INTRODUCTION**

The object tracking is one of the current areas of development in the field of computer vision. This type of processing can be done with static images and sets of images that form a video. There are several algorithms that allow analyze these image sequences to find features within them.

In this paper is shown the implementation of features dynamic tracking filter focused on tracking the pupils of a person in order to find answers to questions such: where are the pupils?, which displacements performed?, what features have detected movements? and the characteristics of the videos influence the efficiency of the filter?

For tracking work correctly, previously performed some filters of improve images that are applied to each frame of the video sequence, among them are converting to grayscale, segmentation for where are initially pupils, a crop of the images to make lighter and easier tracking of pupils, erosion and dilation of the cutout to eliminate possible distractions. In addition to the set of filters applied infrared technology is used to increase the efficiency of tracking and accuracy results.

This work aims to create a tool to help eye care specialists to more accurately diagnose their patients, not replace the work of doctors, let alone give a diagnosis only be a support tool.

## 2. TRACKING OBJECTS

One of the most important topics of computer vision is object tracking. This procedure allows to estimate the position of one or more objects at run time within a sequence of images.

There are different algorithms focused on solving these problems, some more efficient than others depending on the techniques used and factors as the quality of images being processed.

## 3. FEATURES DYNAMIC TRACKING

The basis of dynamic tracking features is the reduction of functional complexity when following salient features of the object, instead of the continuous region of the object or its contours. Therefore work the recognition and object tracking through the extraction elements, grouped at the highest level and then making a features matching between images. Are used as parameters features: corners, color information and texture. In features dynamic tracking of these are dynamically determined and tracked over consecutive frames by estimating feature movement and looking for the next frame.

A point in feature-based tracking is the paradox between complexity and efficiency of monitoring. For low levels features as the position of the coordinates of the edges, which are easy to extract, it is very difficult to make the trace, due to the difficulty of establishing a one to one correspondence between them. [2]

## 3. METODOLOGY

The complete process for the implementation of features dynamic tracking consists of some steps prior to the main algorithm, these steps are performed for increasing the final efficiency of the algorithm. Within the methodology includes the construction of a physical prototype was adopted to obtain videos that have consistent characteristics. At the end of processing as a result is obtained a text file that contains relevant information of the movements that can be analyzed in the image sequences. Complete methodology used is shown in Figure 1:

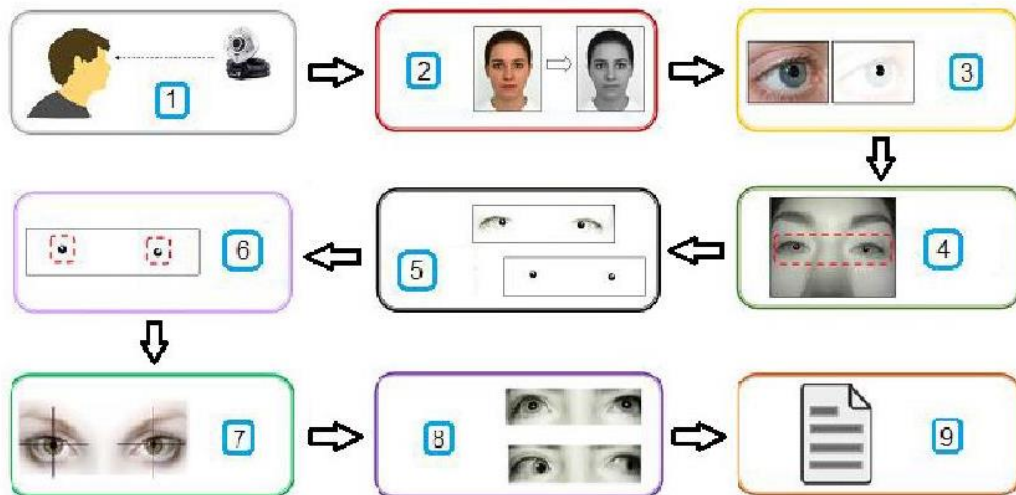


Figure 1. Metodology

The steps observed are: 1 obtaining the videos with the physical prototype, 2 grayscale conversion of the frames that make the video, 3 pupils segmentation, 4 determining the search area, 5 removing distractors, 6 tracing patterns or areas of interest, 7 determining positions of the pupils (x, y), 8 recording movements and 9 generating a text file with relevant information.

## 5. DEVELOPMENT

### 5.1. Obtaining of the videos

To form the basis of test videos a physical prototype was built with features that favoring the shots. Figure 2 shows a diagram of this prototype.

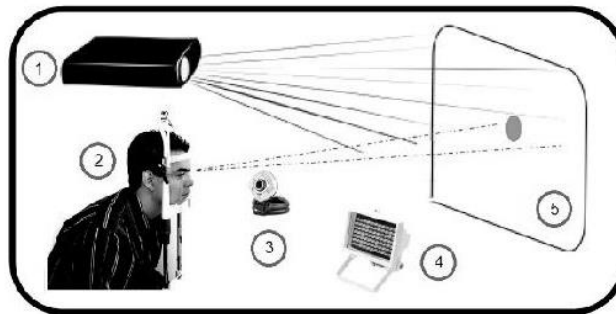


Figure 2. Physical prototype.

The elements constituting the prototype are: 1 projector, 2 chin base for persons to prevent movement of the face, 3 infrared camera, 4 infrared light and 5 animation reflected on a surface in front of the persons, this animation is controlled and allows different types of eye movements and at different speeds. The use of an infrared camera and light of the same technology provides a video with better features for processing.

### 5.2. Grayscale conversión.

To reduce the complexity of processing that is needed it performs the conversion of the images obtained in the first step to their equivalent grayscale because original images are in a format of three values (RGB red, green and blue for its acronym) and its analysis would require more resources.

The formula used is the average of the three original values of each pixel of the images.

$$(R + G + B) / 3 \quad (1)$$

### 5.3. Pupils segmentation

Segmentation is a process whose goal is to separate one or more areas of interest within the image of the background of it. Particularly in this case seeks to segment pupils for two purposes the first to know what position they are initially, this segmentation is done on the entire area of the first frame of the video sequence and the second objective is to find the centers of the pupils in the search area that is defined in step 4 of the methodology.

Thanks to the shots obtained in the first step can be segmented using thresholding method. This method is applied to the gray scale images in which the values for each pixel are between 0 and 255 so as to define a threshold value to section the areas of interest from the rest of the image.

$$Pixel(x, y) > threshold \quad (2)$$

The thresholding is shown in the Figure 3.

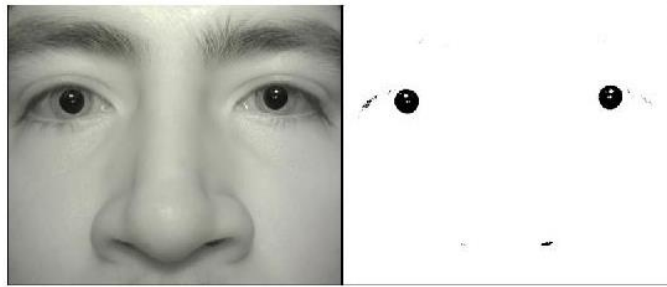


Figure 3. Pupils segmentation.

#### 5.4. Determining the search area

Once the pupils have been segmented and it is known positions are found is possible delimit the region that later will be looking areas of interest. During the course of filter will not be an exhaustive search for the entire area of the images but only on the perimeter close to the coordinates obtained in the previous step. This is done by cropping the image. In Figure 4 shows the result of cropping.

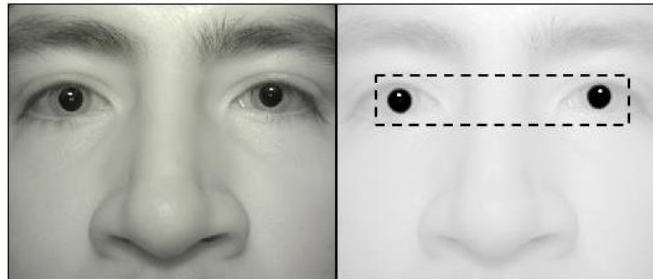


Figure 4. Delimitation of the search area.

#### 5.5. Removing distractors.

In some special cases it may happen that the segmentation does not yield the desired result, for example when in a video appearing lashes with mascara is possible that at the moment of segement addition of the pupils display other zones in the same color range and could confuse the filter, so that these areas have to be removed. This is achieved using erosion and dilation filters. Equation (3) shows the dilation and equation (4) erosion. [3]

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (3)$$

$$A \ominus B = \{z \in E | B_z \subseteq A\} \quad (4)$$

Figure 5 shows the application of the two filters.

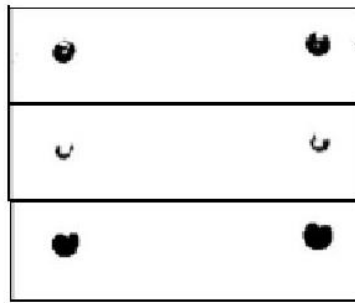


Figure 5. Pupils segmented (above), eroded (middle) and dilated (below).

### 5.6. Tracking areas of interest.

Once the distractions have been eliminated, have images where only seen areas of interest, the last thing to do is to determine the center of the two areas to know their positions in terms of coordinates and repeat steps 4 , 5 and 6 for subsequent frames. Figure 6 shows an sample of the features dynamic tracking filter.



Figure 6. Sample the filter.

A step that is added to the original method of the filter is for cases where the pupils disappear completely because of blinks, in these particular cases the algorithm restarts the process, in other words when the filter does not detect areas interest begins again with the segmentation process to find again the pupils as they appear.

## 6. EXPERIMENTATION

To determine the efficiency of the filter was used videos of people's faces with different features ranging from the length of the video, the eye movements recorded to some physical factors specific to the faces such as tone of the eyes, the kind of eyelashes and eyebrows, if they use makeup or not at the time of capture, among other features. The speed of the video is 20 frames per second. As the objective of the filter is to keep the focus on the pupils, the efficiency lies in not losing any of the position of those areas and the main reason that this problem is propitious by the eye blinking that is an involuntary movement and cannot be excluded from the videos. In Figure 7 shows some of the shots that were tested.



Figure 7. People with different characteristics tested.

The following are important features cases in which the filter was tested.

### 6.1. Experiment 1: pupils on dark color iris.

The filter process is shown in Figure 8:

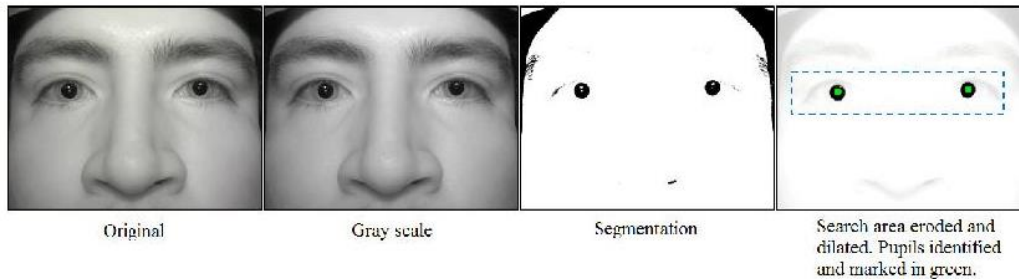


Figure 8. Filter results in people with dark color iris.

The filter tracks pupils with 100% success rate in the 13 videos that have this feature.



### 6.2. Experiment 2: pupils on light color iris.

The filter process is shown in Figure 9:

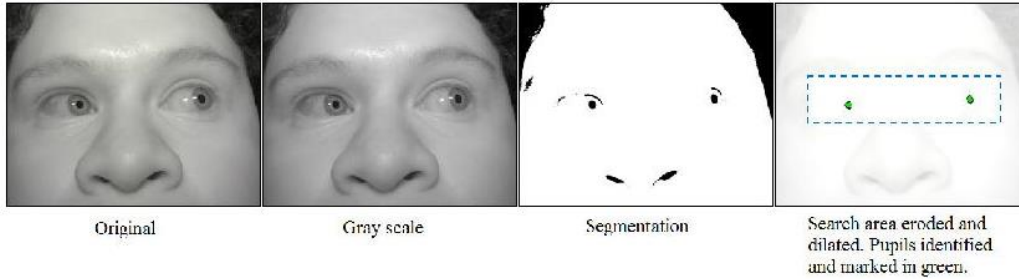


Figure 9. Filter results in people with light color iris.

The filter tracks pupils with 100% success rate in the 5 videos that have this feature.

### 6.3. Experiment 3: eye closed.

The filter process is shown in Figure 10:

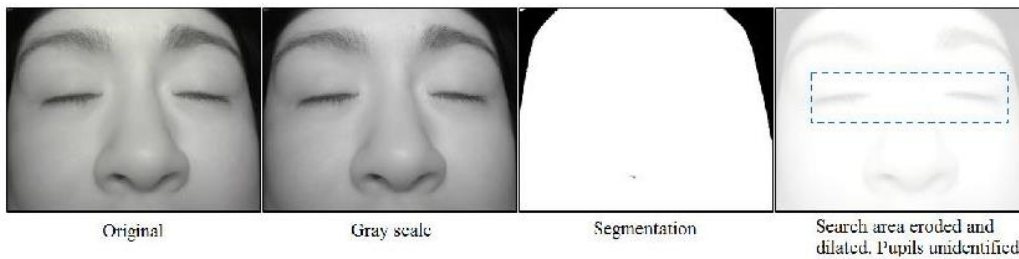


Figure 10. Filter results in scenes with eyes closed.

The eye closure is a movement that cannot be controlled, so inevitably there are scenes where see this problem. As shown in Figure 10 in the search area are not areas of interest so that in these cases, in the frames after the closing of the eyes the segmentation is done until the pupils appear again.

### 6.4. Experiment 4: down gaze.

The filter process is shown in Figure 11:

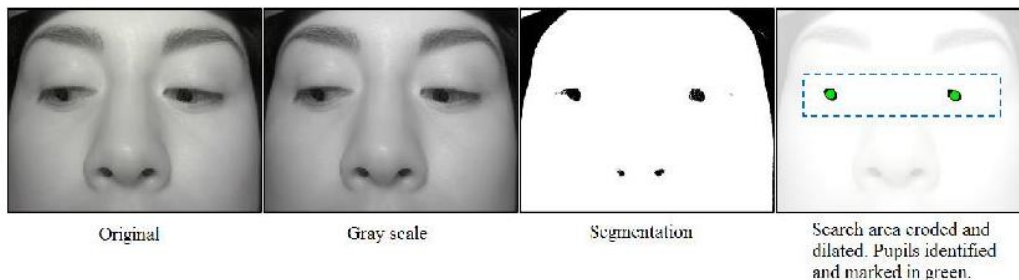


Figure 11. Filter results in scenes with down gaze.

It is important to analyze the response of the filter to this type of movement because in the down gaze the eyelashes appear above the eyes and can be confusing to the filter. In these cases it reaches 100% effective and this is thanks to infrared lighting and camera position (front of the person, at the height of the nose and eyes focused) because both features are implemented physically of the best way so that these cases are not an issue.

### 6.5. Experiment 5: lashes with mascara.

The filter process is shown in Figure 12:

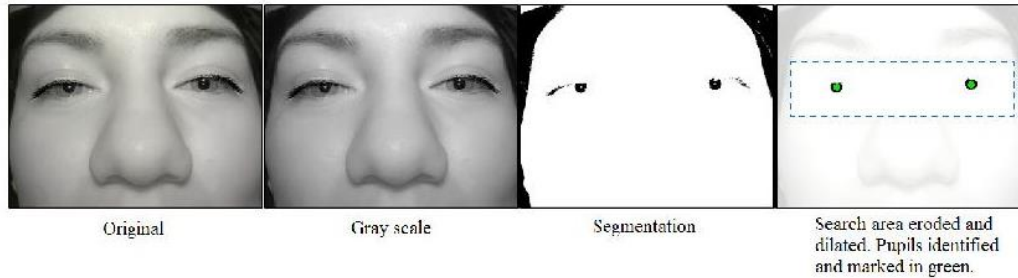


Figure 12. Filter results in persons with lashes with mascara.

The filter responded with an efficiency of 100% over the only video of a person using mascara on her eyelashes.

The selected cases are important to mention as they have different characteristics that could subtract the filter efficiency, may not be the only ones however to get the first reliable results are the most appropriate.

## 7. RESULTS

The filter was tested with a test basis consists of 18 videos of different people (age, sex, color of eyes and lashes with mascara). Are processed 20fps. There are two particular cases where the filter has the following behaviors: first when there is complete closure of the eyes stop scanning filter areas of interest and when appear again the filter recovers them immediately in the following frame starting again with the tracking process, the second case is when the gaze is downward, eyelashes interfere with pupils but the filter is able to recognize areas of interest without problem. The effectiveness is 98% due to the type of processing performed and the processing speed is 4.5 seconds for a video consisting of 1200 frames. The results can be seen in more detail in Tables 1 and 2.

Table 1. Velocity of processing.

Video	Duration	Frames (20fps)	Time
1	36 seg	720	2.64
2	56 seg	1120	4.10666667
3	49 seg	980	3.59333333
4	54 seg	1080	3.96
5	54 seg	1120	4.10666667
6	51 seg	1080	3.96
7	45 seg	900	3.3
8	50 seg	1000	3.66666667
9	50 seg	1000	3.66666667
10	47 seg	940	3.44666667
11	57 seg	1140	4.18
12	54 seg	1080	3.96
13	67 seg	1340	4.91333333
14	51 seg	1020	3.74
15	61 seg	1220	4.47333333
16	48 seg	960	3.52
17	64 seg	1280	4.69333333
18	58 seg	1160	4.25333333

Table 2. Comparison of errors and successes.

Comparison mistakes and successes			
Video	False positive	False negative	% Effectiveness
1	0	21	97.08333333
2	0	235	79.01785714
3	0	12	98.7755102
4	*	-	-
5	0	7	99.375
6	0	16	98.51851852
7	0	145	83.88888889
8	0	8	99.2
9	0	3	99.7
10	0	16	98.29787234
11	*	-	-
12	0	24	97.77777778
13	0	261	80.52238806
14	0	12	98.82352941
15	0	7	99.42622951
16	0	6	99.375
17	0	15	98.828125
18	0	152	86.89655172

## 8. CONCLUSIONS

The implemented filter throws an efficiency of 98%, in part due to the quality of the images obtained because they have features that facilitate processing also in cases of occlusion continues to respond adequately recovering well. As shown in the methodology applies two morphological filters (erosion and dilation) to increase tracing efficiency, usually dynamic tracking features are used in a manner not obligatory therefore constitutes a significant improvement to the process and results.

Addition to tracking efficiency, the filter shows acceptable processing speed because for the video with the highest number of frames (1220) the process has a duration of no more than 5 seconds.

This work can be used in the creation of a tool to support studies and other analyzes in the field of eye care.

## 9. FUTURE WORK

As part of the work that can be done later is to increase the videos base, with the aim of finding other cases to test the tracking response and try other filters in the methodology that can increase efficiency and speed of the application.

## REFERENCES

- [1] Bernd, Girod (2013) "Morphological image processing 1", Stanford University
- [2] Gurjeet & Rajneet (2013) "Review on recent image segmentation techniques", Sri Guru Granth Sahib World University
- [3] Aksit, Kaan (2013) "Dynamic exit pupil trackers for autostereoscopic displays", Koç University
- [4] Majid, Tajeri (2012) "Real time eye tracking in unconstrained environments", Islamic Azad University
- [5] Swirski, Lech (2012) "Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images", University of Cambridge
- [6] Mantink, Radoslaw (2012) "Do-it-yourself eye tracker: low-cost pupils-based eye tracker for computer graphics applications", West Pomeranian University of Technology in Szczecin
- [7] González & Wood (2012) "Digital Image processing", Prentice Hall
- [8] Yáñez, Javier (2010) "Tracking de personas a partir de visión artificial", Universidad Carlos III de Madrid
- [9] Platero, Carlos (2009) "Apuntes de visión artificial", Departamento de Electrónica, Automática e Informática Industrial

**AUTHORS**

Salvador Medrano Romero. Degree in computer science from the Technological Institute of Apizaco.



María Guadalupe Medina Barrera. Master of Science in Computer Science from the National Center for Research and Technological Development. Researcher of the Master in Computer Systems of the Institute Technology of Apizaco and faculty member PROMEP "Information systems".



José Juan Hernández Mora. Computer Engineering from the Autonomous University of Tlaxcala. Master of Science in Computer Science from the National Center for Research and Technological Development. Currently Head of Technologies Intelligent and Research Laboratory of the Institute Technology of Apizaco.



Luis Carlos Altamirano received his Ph.D. degree at National Polytechnic Institute (México) in 2002. His interest areas include: Computer Vision, Image Processing, Remote Sensing and Artificial Intelligence. He has participated in several different projects including: Oil projects and Computer Vision Projects. Currently, he is full time professor in the Computer Science Department at Autonomous University of Puebla and head of Postgraduate Department at the same Institution.



---

## ***Referencias bibliográficas.***

---

[Li et al., 2008] Feng Li, Susan Munn y Jeff Pelz. A model-based to video-based eye tracking. *Journal of Modern Optics*, Vol. 55, Nos. 4-5, March 2008.

[Sadri et al., 2012] Morteza Sadri, Kaveh Kangarloo y Fardad Farokhi. Particle filtering in the design of an accurate pupil tracking system. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 51, No. 8, Agosto 2012.

[Rodríguez, 2009] Álvaro Rodríguez Moya. Estudio del filtro de partículas aplicado al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes. Universidad Carlos III de Madrid. Ing. Tec. Telecomunicación especialidad sonido e imagen. Proyecto fin de carrera. 2009.

[Chaparro, 2009] Eva Chaparro Laso. Tracking automático de objetos en secuencias de imágenes usando filtro de partículas. Universidad de Extremadura. Escuela Politécnica de Cáceres. Master Thesis. Octubre 2009.

[Moreno, 2013] Tamara Moreno Martín. Diseño, implementación y validación de un sistema de control para Smartphone basado en la tecnología de gaze-tracking. Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de ingeniería informática. Proyecto de fin de carrera. 2013.

[Hassan y Herrero, 2007] Yusef Hassan Montero y Víctor Herrero Solana. Eye-tracking en interacción persona-ordenador. *Revista sobre personas, diseño y tecnología*. Octubre 2007.

[Chau y Betke 2005]. Machael Chau y Margrit Betke. Real time eye tracking and blink detection with usb cameras. Boston University. Technical Report No. 2005-12. Mayo 2005.

[Díaz et al., 2011] C. F. Díaz Meza, Y. Torres Moreno y O. J. Tijaro Rojas. Extracción digital de características biométricas basadas en patrones del iris humano. *Revista colombiana de física*, Vol. 43, No. 2. Septiembre 2011.

[Llaca et al., 2012] Fernando Llaca Romero, Alberto Morales Calvy y Alejandro Rojas López. Identificación de personas mediante imágenes del iris. Universidad de Sevilla, España. Departamento de Matemática aplicada I. 2012.

[Florian y Carranza 2006] Laura Florian Cruz y Fredy Carranza Athó. Reconocimiento del iris. Universidad Nacional de Trujillo. Tópicos especiales en procesamiento gráfico. 2006

[Terissi et al., 2006] Lucas D. Terissi, Lucas Cipollone y Patricio Baldino. Sistema de reconocimiento del iris. *Revista Argentina de trabajos estudiantiles*, Vol. 1, No. 2. Marzo 2006.

---

[Rodríguez et al., 2010] Manuel Rodríguez Vallejo, Adela Bernabeu Juárez, Soraya García Pérez y Lucia Leal Pino. Evaluación de los movimientos oculares sacádicos mediante un videojuego de entrenamiento de la motilidad ocular. Artículo científico. Departamento de óptica y optometría en Boston. 2010.

[Rodríguez, 2003] Patricia Rodríguez Muñoz. Aplicación del filtro de Kalman al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes. Universidad Rey Juan Carlos. Ingeniería técnica en informática de sistemas. Tesis. 2003.

[Burgueño, 2003] Eva Burgueño Raigal. Aplicación del filtro de partículas al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes. Universidad Rey Juan Carlos. Ingeniería técnica en informática de sistemas. Tesis. 2003.

[Shirinzadeh, 2012] Fatemeh Shirinzadeh, Hadi Seyedarabi y Ali Aghagolzadeh. Facial features tracking using auxiliary particle filtering and observation model based on bhattacharyya distance. International journal of computer theory and engineering, Vol. 4, No. 5, Octubre 2012.

[Mottalli, 2008] Marcelo Luis Mottalli. Implementación de un Sistema de identificación de personas en tiempo real por reconocimiento de iris. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ciencias exactas y naturales. Departamento de computeación. Tesis. Octubre 2008.

[Tajeri, 2012] Majid Tajeri, Mahmoud Mahlouji y Hosseinbrahimpour-Komleh. Real time eye tracking in unconstrained environments. Internarional Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 4, No.1, Julio 2012.

[Ji, 2002] Qiang Ji y Xiaojic Yang. Real-time eye, gaze, and face pose tracking for monitoring driver vigilance. Revista electrónica. 2002.

[Otsu, 1979] Noboyuki Otsu. A threshold selection Method from gray-level Histograms. Journal IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 9, No. 1, Enero 1979.

[Toldos, 2009] Gonzalo Toldos. Algoritmos de localización basados en procesamiento de imágenes. Documento. Versión 1.0. Octubre 2009.

[Pons, 2004] A. Pons Martínez. Tipos de movimientos oculares, fundamentos de visión binocular. Universidad de Alacant. 2004.

[González y Woods, 2002] Rafael C. González y Richard E. Woods. Digital Image Processing, Second edition. Prentice Hall. 2002.

[González et al., 2006] Ana González Marcos, Francisco Javier Martínez de Pisón Ascacibar, Alpha Verónica Pernía Espinoza, Fernando Alba Elías, Manuel Castejón Limas, Joaquín



---

Ordieres Meré y Eliseo Vergara González. Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial. Universidad de la Rioja. Servicio de Publicaciones. 2006.

[Platero, 2009] Carlos Platero Dueñas. Apuntes de visión artificial, procesamiento morfológico. Departamento de electrónica, automática e informática industrial. 2009.

[Martín, 2004] Marcos Martín. Técnicas clásicas de segmentación. Artículo científico. Mayo 2004.

[Shapiro, 1992] L. G. Shapiro y R. M. Haralick. Computer and robot visión. Vol. 1, Addison Wesley, Reading, Ma. 1992.

[Martínez, 2005] J. Ramiro Martínez de Dios. Visión por computador, técnicas de segmentación I. Automática Robótica y Telemática. 2005.

[Salavert, 2001] Antonio Salavert Casamor. Formatos de video digital. Libro digital. 2011.

[Yáñez, 2010] Javier Yáñez García. Tracking de personas a partir de visión artificial. Universidad Carlos III de Madrid. Proyecto de fin de carrera. 2010.

[Roncagliolo, 2007] Pablo Roncagliolo B. Procesamiento digital de imágenes. Universidad de Valparaíso. Chile. 2007.

[Tejedor, 2009] Jesús Tejedor Gómez. Análisis comparativo de algoritmos en segmentación de iris. Universidad Carlos III de Madrid. Junio 2006.

[Alba et al., 2006] José Luis Alba, Jesús Cid e Inmaculada Mora. Métodos de análisis de imágenes. Universidad de Vigo, Universidad Carlos III de Madrid y Universidad Rey Juan Carlos. Marzo 2006.

[Sanjeev et al., 2002] M. Sanjeev Arulampalam, Simon Maskell, Neil Gordon y Tim Clapp. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian Bayesian tracking. IEEE transactions on signal, processing, Vol. 50, No. 2, Febrero 2002.

[Salgado, 2007] Luis Salgado. Visión artificial: fundamentos y aplicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 2007.

[Zuloaga, 1998] Aitzol Zuloaga Izaguirre. Visión artificial dinámica determinación de movimiento a partir de secuencias de imágenes. Universidad del País Vasco. Doctorado en tecnologías de la información. Septiembre 1998.

[Pérez y Reinoso 2003] Carlos Pérez y Oscar Reinoso. Técnicas de tracking. Universidad Miguel Hernández. Depto. De ingeniería de sistemas industriales. Mayo 2003.