



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE BIOMEDICINA**

**APLICACIÓN DE TÉCNICA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS  
DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES EN PACIENTES CON NISTAGMO  
DURANTE LA REHABILITACIÓN VISUAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO BIOMÉDICO**

**AUTOR: SALAZAR CHASI ERICK RODOLFO**

**TUTOR: ING. LUIS GEOVANNY ROMERO MEJÍA**

**Quito – Ecuador**

**2024**

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Salazar Chasi Erick Rodolfo con documento de identificación No. 1003808712 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 01 de agosto del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'ERICK SALAZAR', is written over a horizontal dashed line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Salazar Chasi Erick Rodolfo

1003808712

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Salazar Chasi Erick Rodolfo con documento de identificación No. 1003808712, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: **"APLICACIÓN DE TÉCNICA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES EN PACIENTES CON NISTAGMO DURANTE LA REHABILITACIÓN VISUAL"**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Biomedicina, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de agosto del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'ERICK SALAZAR', is written over a horizontal dashed line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Salazar Chasi Erick Rodolfo

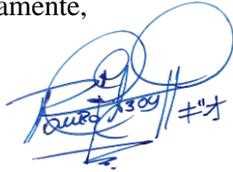
1003808712

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Geovanny Romero Mejía con documento de identificación No. 1714731203, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "**APLICACIÓN DE TÉCNICA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES EN PACIENTES CON NISTAGMO DURANTE LA REHABILITACIÓN VISUAL**", realizado por Salazar Chasi Erick Rodolfo con documento de identificación No. 1003808712, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de agosto del año 2024

Atentamente,



-----  
Ing. Luis Geovanny Romero Mejía

1714731203

# Dedicatoria

Agradezco a Dios por la guía, fortaleza y paciencia brindadas a lo largo de este tiempo. Gracias por no permitir que me rinda, por siempre proporcionarme motivación y aprendizaje a través de las personas, amigos y seres queridos que he encontrado en mi vida.

Agradezco profundamente a mi padre, quien, a pesar de haber deseado un camino diferente para mí, nunca dejó de brindarme su apoyo durante todo el proceso. Ha sido un pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional. Me ha enseñado que los errores del pasado son lecciones valiosas que nos ayudan a ser mejores personas en el presente.

A mi madre, quien, a pesar de la distancia, siempre me brindó un apoyo incondicional. Sus palabras de motivación fueron cruciales para tomar decisiones importantes en mi vida. Gracias a su constante apoyo, he llegado hasta este punto. Le agradezco infinitamente todo el esfuerzo y dedicación que ha dado por mí y por mis hermanos.

Salazar Chasi Erick

# Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por el don de la vida y por ser mi guía y fortaleza durante todo este proceso académico. Sin su gracia y bendición, no habría sido posible alcanzar este logro.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en un entorno de excelencia y valores. A mis docentes, cuyo conocimiento, dedicación y orientación han sido fundamentales en mi desarrollo profesional y personal.

A mis compañeros, quienes han sido parte esencial de este recorrido académico. Gracias por su apoyo, colaboración y amistad, que han hecho de esta experiencia algo inolvidable.

Con sincera gratitud y aprecio.

Salazar Chasi Erick

## Resumen

El presente estudio se centra en la aplicación de la técnica del seguimiento ocular basado en características oculares para analizar los movimientos oculares de pacientes con nistagmo durante la rehabilitación visual, esto demuestra el potencial para el análisis objetivo y cuantitativo de los movimientos oculares en pacientes con nistagmo, lo que puede contribuir a mejorar los procesos de diagnóstico y rehabilitación visual de estas condiciones.

El objetivo principal fue desarrollar un sistema de rastreo ocular basado en visión artificial para ver de manera precisa los movimientos oculares de estos pacientes.

El sistema de visión artificial se creó empleando el lenguaje de programación Python en el entorno de desarrollo integrado (IDE) PyCharm. Este software sirvió para el desarrollo del sistema en Python, lo que permitió evaluar diversos aspectos relacionados con el nistagmo, un trastorno ocular caracterizado por movimientos oculares involuntarios. Específicamente, el sistema fue capaz de realizar la detección del ojo, cálculo de la amplitud, medición del período y frecuencia de los movimientos oculares, cálculo del índice de Nistagmo.

Los resultados demostraron que el sistema de visión artificial fue efectivo en la detección de los movimientos oculares. Además, se observaron mejoras significativas en los patrones de movimiento ocular de los pacientes después de su proceso de rehabilitación, lo que sugiere la utilidad del sistema en el seguimiento y evaluación de los pacientes.

**Palabras clave:** (Visión artificial, Rastreo ocular, Movimientos oculares, Nistagmo, Rehabilitación visual, Análisis de movimientos oculares, Diagnóstico y seguimiento de pacientes, Evaluación de efectividad de tratamientos).

## Abstract

The present study focuses on the application of the eye tracking technique based in ocular characteristics to analyze the eye movements of patients with nystagmo during visual rehabilitation, this demonstrates the potential for objective analysis and quantitative of eye movements in patients with nystagmus, which may contribute to improve the diagnostic and visual rehabilitation processes of these conditions. The main objective was to develop an eye tracking system based on artificial vision to accurately see the eye movements of these patients. The artificial vision system was created using the Python programming language in the PyCharm integrated development environment (IDE). This software was used for the development of system in Python, which allowed evaluating various aspects related to nystagmus, an eye disorder characterized by involuntary eye movements. Specifically, The system was able to perform eye detection, amplitude calculation, measurement of period and frequency of eye movements, calculation of the Nystagmus index. The results demonstrated that the artificial vision system was effective in detecting eye movements. Furthermore, significant improvements were observed in the patterns of eye movement of patients after their rehabilitation process, which suggests the usefulness of the system in the monitoring and evaluation of patients.

**Keywords:** palabras clave en inglés (Artificial vision, Eye tracking, Eye movements, Nystagmus, Reha- Visual entitlement, Eye movement analysis, Diagnosis and eye tracking cients, Evaluation of effectiveness of treatments)

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>ii</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivos	6
1.1.1. Objetivo General	6
1.1.2. Objetivos Específicos	6
<b>2. Fundamentación Teórica</b>	<b>7</b>
2.1. Nistagmo	7
2.1.1. Tipos de nistagmos	7
2.1.2. Etiopatogenias del nistagmos	9
2.1.3. Características clínicas	9
2.1.4. Métricas cuantitativas del nistagmo	11
2.1.5. Técnicas de exploracion/evaluación del nistagmo	12
2.1.6. Interpretación de los resultados de la exploración	16
2.1.7. Limitaciones de las técnicas convencionales:	17
2.2. Rehabilitación visual	18
2.2.1. Importancia de la rehabilitación visual en pacientes con nistagmo	18
2.2.2. Tipos de Rehabilitación visual	20
2.3. Visión artificial	25
2.3.1. Sus principales componentes	26
2.3.2. Identificación de desafíos y oportunidades de mejora	27
2.4. Técnicas de visión artificial	29
2.4.1. Procesamiento de imágenes y videos	29
2.4.2. Reconocimiento de patrones	31
2.4.3. Aprendizaje profundo (deep learning)	32
2.4.4. Visión estereoscópica y 3D:	32
<b>3. Metodología</b>	<b>34</b>
3.1. Selección de hardware	35
3.1.1. Selección del lenguaje de programación	35
3.1.2. Selección de la técnica de visión artificial	36

---

3.1.3. Técnica de captura de videos de los movimientos oculares . . . . .	37
3.2. Proceso del sistema de visión artificial . . . . .	37
3.3. Proceso del sistema de visión artificial . . . . .	43
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>45</b>
4.1. Fase de Evaluación del Funcionamiento . . . . .	45
4.2. Resultados . . . . .	46
4.2.1. Análisis de resultados de una persona que padece de un índice de nistagmo severo . . . . .	46
4.2.2. Análisis de resultados de una persona que tiene un índice de nistagmo severo . . . . .	48
4.2.3. Análisis de resultados de una persona que tiene un índice de nistagmo moderado . . . . .	49
4.3. Resultados de personas que no padecen este diagnóstico . . . . .	51
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>52</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	52
5.2. Recomendaciones . . . . .	53
<b>A. Anexo: Código del sistema de visión artificial</b>	<b>54</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>

# Lista de Tablas

<b>3-1.</b> Tabla de valores segun su nivel de nistagmo . . . . .	39
<b>4-1.</b> Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo severo . . . .	47
<b>4-2.</b> Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo severo . . . .	48
<b>4-3.</b> Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo moderado . .	50
<b>4-4.</b> Resultados de los videos de personas normales . . . . .	51

# Lista de Figuras

2-1. <i>Nistagmo en resorte y un nistagmo pendular</i> . . . . .	10
2-2. <i>Representacion gráfica características del nistagmo</i> . . . . .	11
2-3. <i>Exploración del nistagmo</i> . . . . .	13
2-4. <i>Electronistagmografía</i> . . . . .	14
2-5. <i>Visión artificial</i> . . . . .	25
3-1. <i>Amplitud en Grados del Ojo</i> . . . . .	40
3-2. <i>Sección 1 del Proceso del sistema de visión artificial</i> . . . . .	43
3-3. <i>Sección 2 del Proceso del sistema de visión artificial</i> . . . . .	44
4-1. <i>Resultado del video patron nivel Severo</i> . . . . .	45
4-2. <i>Resultado del video patron nivel moderado</i> . . . . .	46
4-3. <i>Resultado del video patron nivel leve</i> . . . . .	46
4-4. <i>Resultado del video patron normal</i> . . . . .	46
4-5. <i>Comparación de Resultados</i> . . . . .	47
4-6. <i>Comparación de Resultados</i> . . . . .	49
4-7. <i>Comparación de Resultados</i> . . . . .	50

# 1. Introducción

El nistagmo es un trastorno ocular caracterizado por movimientos oculares involuntarios y oscilatorios. Estos movimientos dificultan la fijación visual y pueden afectar severamente la percepción y el procesamiento de la información visual.

En los últimos 10 años, programas de rehabilitación visual como la terapia de entrenamiento visual, la adaptación óptica y la terapia de percepción visual han demostrado ser efectivos para ayudar a los pacientes con nistagmo a mejorar sus habilidades visuales y adaptarse a las limitaciones causadas por este trastorno (Bahdanau, 2014).

Durante los últimos siete años, se han realizado investigaciones centradas en el desarrollo de un sistema automatizado para el análisis del nistagmo utilizando técnicas de procesamiento de imágenes, como la detección y el seguimiento de los movimientos oculares. Estas técnicas permiten identificar características relevantes de los patrones de nistagmo y, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, como las máquinas de vectores de soporte (SVM), validar la precisión y eficacia del enfoque propuesto en experimentos y evaluaciones con conjuntos de datos clínicos. (Leigh, 2017).

En los últimos once años, ha habido un creciente interés en el campo médico por la aplicación de técnicas de visión artificial, especialmente en el seguimiento ocular (eye tracking) (AlRahayfeh, 2013). Estos sistemas facilitan un análisis y monitoreo preciso y detallado de los movimientos oculares de los pacientes.

Al registrar con gran precisión las oscilaciones y patrones de movimiento ocular, los profesionales de la salud pueden acceder a información valiosa que les ayuda a comprender mejor las características y la progresión del nistagmo, una condición ocular compleja caracterizada por movimientos oculares involuntarios y oscilatorios (DellOso, 2006).

En este sentido, la técnica de visión artificial del seguimiento ocular basado en características oculares se ha convertido en una herramienta valiosa para que los terapeutas visuales puedan ajustar y optimizar las estrategias terapéuticas, adaptándolas a las necesidades específicas de cada individuo (DellOso, 2006).

El uso de sistemas de visión artificial en la rehabilitación visual de pacientes con trastornos

oculares como el nistagmo aporta múltiples beneficios. Permite un registro preciso de datos como patrones de movimiento ocular y fijación visual, lo que brinda a los terapeutas una comprensión más profunda de las capacidades y limitaciones de cada paciente. La información cuantitativa obtenida les permite ajustar de manera más efectiva los tratamientos, adaptándolos a las necesidades específicas de cada individuo y logrando mejores resultados y calidad de vida. Además, estos sistemas facilitan un seguimiento y monitoreo exhaustivo de la evolución de los pacientes, permitiendo una evaluación objetiva de sus progresos y los ajustes necesarios en los tratamientos para asegurar una mejora continua (Lazcano, 2010).

Estos avances tecnológicos se basan en la utilización de cámaras de alta velocidad y algoritmos de visión artificial avanzados, que permiten rastrear y analizar los movimientos oculares de manera mucho más objetiva y sistemática que la evaluación clínica realizada por expertos. Además, los sistemas de visión artificial han demostrado una excelente fiabilidad y reproducibilidad en sus mediciones, lo que los hace comparables e incluso superiores a las evaluaciones manuales en términos de precisión y consistencia (Parra, 2004).

Los hallazgos de estos estudios sugieren que la incorporación de los sistemas de visión artificial en la práctica clínica podría representar una mejora significativa en la identificación, monitoreo y valoración del tratamiento de trastornos relacionados con el nistagmo. Al proporcionar una forma más objetiva, estandarizada y cuantitativa de medir este tipo de movimientos oculares, estos sistemas podrían contribuir a un mejor entendimiento de los mecanismos subyacentes, así como a una detección más temprana y un seguimiento más preciso de las condiciones asociadas al nistagmo. En conjunto, estas innovaciones tecnológicas tienen el potencial de transformar la forma en que se aborda clínicamente el diagnóstico y el manejo de afecciones relacionadas con el nistagmo (Parra, 2004).

La aplicación de algoritmos de visión artificial ha supuesto un avance significativo en la evaluación clínica de pacientes con problemas de nistagmo. Estos algoritmos han demostrado ser eficaces para la clasificación y análisis detallado de diferentes patrones de nistagmo, como el vertical, horizontal y rotatorio (Espinosa, 2022).

A diferencia de la evaluación manual realizada por expertos clínicos, el uso de estos algoritmos permite una cuantificación más objetiva y reproducible de las características del nistagmo, incluyendo la frecuencia, amplitud y dirección de los movimientos oculares oscilatorios. Esta información más precisa y detallada representa una ventaja significativa, ya que puede ayudar a los médicos a realizar diagnósticos más acertados de las afecciones subyacentes que causan el nistagmo, así como a monitorear de manera más efectiva la evolución de los pacientes a lo largo del tiempo.

En este sentido, el uso de algoritmos de visión artificial en el campo de la oftalmología y la neurología constituye una herramienta prometedora que facilita mejorar la evaluación clínica de los pacientes con problemas de nistagmo. Mediante un enfoque más objetivo y cuantificable, estos algoritmos tienen el potencial de contribuir a un manejo más eficaz y personalizado de este tipo de trastornos (Espinosa, 2022).

En los últimos siete años, el progreso de las metodologías de visión artificial y procesamiento de imágenes ha permitido el desarrollo de sistemas automatizados de detección y cuantificación del nistagmo, un movimiento ocular involuntario de gran relevancia clínica (Quintana, 2021). Esto se debe a la capacidad de los algoritmos de visión artificial para detectar sutiles patrones de movimiento ocular que podrían pasar desapercibidos por el ojo humano, además de eliminar la variabilidad inherente a la evaluación subjetiva.

La evaluación remota del nistagmo utilizando sistemas de visión artificial emerge como una herramienta prometedora para optimizar el acceso y la calidad de la atención médica, particularmente en regiones con recursos limitados. Los estudios han demostrado de manera concluyente la viabilidad y eficacia de este enfoque, el cual permite capturar y analizar los movimientos oculares involuntarios de manera confiable a través de cámaras web o de smartphones, sin necesidad de que el paciente se desplace a un entorno clínico tradicional (Sanabria, 2011). Estas soluciones han mostrado una precisión y concordancia elevadas en comparación con los métodos de evaluación estándar, abriendo la puerta a una detección y diagnóstico más tempranos de los trastornos asociados al nistagmo, así como a un seguimiento más efectivo de estos pacientes (Sanabria, 2011).

La integración de los datos generados por técnicas de visión artificial aplicadas al análisis del nistagmo con otros tipos de evaluaciones clínicas, como pruebas de función vestibular o neuroimágenes, presenta importantes oportunidades para mejorar el proceso diagnóstico y el seguimiento de pacientes con trastornos vestibulares o neurológicos. Estos estudios han demostrado que la cuantificación objetiva y precisa de las características del nistagmo a través de la visión artificial puede complementarse de manera sinérgica con otros marcadores clínicos relevantes (Vico, 2023).

Al combinar esta información multimodal, los profesionales de la salud pueden adquirir una imagen más completa y detallada del estado del paciente, lo que facilita una identificación más acertada de la causa subyacente de los síntomas presentados. Adicionalmente, el monitoreo longitudinal de los cambios en los patrones de nistagmo, en conjunto con la evolución de otros indicadores clínicos, puede resultar de gran utilidad para hacer un seguimiento más efectivo de la evolución de la enfermedad y la reacción a los tratamientos implementados. De este modo, la integración de datos de visión artificial del nistagmo con otras evaluaciones clínicas relevantes tiene el potencial de optimizar significativamente el manejo clínico de los pacientes, conduciéndolos a diagnósticos más precisos y a un seguimiento más eficaz de su condición (Vico, 2023).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Crear un sistema de rastreo ocular basado en visión artificial para el análisis de los movimientos oculares en pacientes con nistagmo durante su proceso de rehabilitación visual.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar un algoritmo de visión artificial que permita detectar y seguir con precisión los ojos de pacientes con nistagmo en tiempo real.
- Crear y validar métodos cuantitativos que permitan medir la amplitud, el período y la frecuencia de los movimientos oculares en pacientes con nistagmo, con el fin de evaluar la severidad y el progreso durante la rehabilitación.
- Llevar a cabo un estudio clínico con pacientes diagnosticados con nistagmo para evaluar la efectividad del sistema en el seguimiento y análisis de los movimientos oculares durante su proceso de rehabilitación visual.

## 2. Fundamentación Teórica

### 2.1. Nistagmo

El nistagmo se define como un movimiento ocular involuntario que afecta a uno o ambos ojos, manifestándose en diferentes direcciones. En términos generales, el nistagmo se puede clasificar en dos categorías principales: según su origen, ya sea fisiológico o patológico, y según el momento de su aparición, ya sea congénito o adquirido[18].

El nistagmo congénito se presenta desde el nacimiento o poco tiempo después y está relacionado comúnmente con anomalías en las vías aferentes ópticas, lo que se denomina nistagmo sensorial. Por otro lado, el nistagmo adquirido generalmente se debe a anomalías en la información vestibular, enfermedades neurológicas o efectos adversos de determinados medicamentos.[18]

El nistagmo puede manifestarse de forma unilateral o bilateral. En los casos de manifestación unilateral, suele presentar una asimetría más pronunciada que una verdadera unilateralidad. Cuando el nistagmo afecta a ambos ojos, se observa un movimiento pendular, mientras que en el caso de una afectación unilateral, se observa un movimiento en resorte, donde la fase lenta del movimiento indica el lado afectado. Este movimiento puede ser tanto conjugado como disyuntivo, y puede presentarse en direcciones horizontal, vertical, torsional, o en cualquier combinación superpuesta de estos movimientos.[19].

#### 2.1.1. Tipos de nistagmos

Existen diferentes tipos de nistagmo, los cuales se clasifican según ciertas características y patrones de movimiento.

1. **Nistagmo congénito:**El nistagmo congénito o infantil constituye un movimiento ocular involuntario que puede afectar a uno o ambos ojos, manifestándose desde el nacimiento o durante los primeros seis meses de vida. Este tipo de nistagmo se clasifica en diversas categorías según su causa y los componentes clínicos observados.[23].
2. **Nistagmo sensorial:**Es causado por una visión defectuosa y se caracteriza por movimientos horizontales y pendulares de los ojos. La gravedad de este tipo de nistagmo

varía según el grado de pérdida visual. Está asociado con diversas alteraciones oculares, como microftalmia, cataratas congénitas, aniridia, anomalía de Peters, albinismo oculocutáneo y ocular, hipoplasia y coloboma del nervio óptico, amaurosis congénita de Leber y monocromatismo de bastones, entre otras. Estas condiciones generalmente se presentan al nacer o durante los primeros seis meses de vida.[8].

3. **Nistagmo motor:** Puede ser provocado por múltiples factores, tanto primarios como secundarios, relacionados con el desarrollo o el control del movimiento ocular. Cuando se presenta como un defecto primario, generalmente es evidente desde el nacimiento o durante los primeros meses de vida y puede persistir a lo largo de toda la vida. Es importante destacar que la severidad del nistagmo puede variar y disminuir con el tiempo[17].

Este movimiento es predominantemente horizontal y puede adoptar una forma pendular o de sacudida. Además, tiende a disminuir durante la convergencia visual, desaparece durante el sueño y se intensifica con el esfuerzo de fijar la mirada.

4. **Nistagmo latente:** puede presentarse de forma monocular, es decir, aparece al ocluir un ojo, pero está ausente cuando se observa binocularmente. Este tipo de nistagmo se caracteriza por ser un nistagmo en resorte, caracterizado por una fase lenta de velocidad decreciente de manera exponencial, similar a la del nistagmo provocado por el movimiento ocular voluntario.[10].

En algunas ocasiones, al cerrar ambos ojos, puede aparecer un nistagmo en resorte con una fase lenta lineal. Esta condición suele estar asociada con la endotropía congénita. Además, el nistagmo latente se manifiesta en pacientes con ambliopía o estrabismo, quienes, aunque pueden ver con ambos ojos, solo logran fijar la mirada con uno de ellos. En este tipo de nistagmo, las fases lentas siguen un patrón de decrecimiento exponencial, mientras que la fase rápida siempre se dirige hacia el ojo que está fijando la mirada.

5. **Nistagmo vestibular:** El nistagmo horizontal en resorte puede manifestarse de dos maneras: horizontal con un componente torsional o completamente horizontal, con una fase lenta lineal. Este tipo de nistagmo se caracteriza por un aumento del movimiento al mirar hacia el lado de la fase rápida y una disminución al mirar hacia el lado de la fase lenta. En casos de lesión central, la dirección del nistagmo puede invertirse al mirar hacia el lado de la fase lenta. Generalmente, este tipo de nistagmo está acompañado de vértigo.[7].

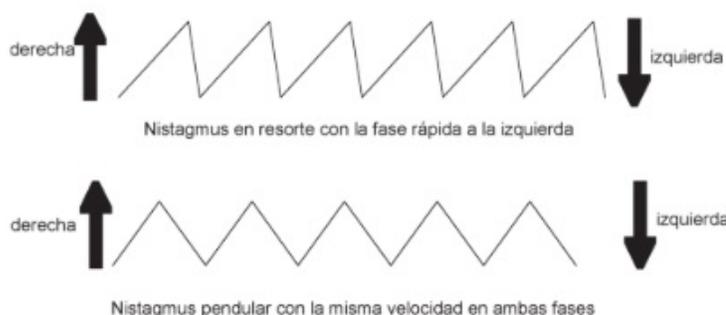
### 2.1.2. Etiopatogenias del nistagmos

1. Las estructuras responsables de mantener la estabilidad de la mirada en la posición primaria pueden causar movimientos descontrolados en algunos individuos. Esto sucede debido a una ganancia excesivamente alta en los movimientos oculares lentos, lo que resulta en un movimiento desbocado (con velocidad creciente) o en una oscilación pendular.[2].
2. El sistema encargado de mantener la mirada excéntrica estable, conocido como el integrador neural, puede provocar nistagmo cuando los ojos están en una posición excéntrica. En estos casos, los ojos no pueden mantener esa posición y regresan a la posición primaria con una velocidad decreciente.[34].
3. El sistema del reflejo vestíbulo-ocular (VOR) se encarga de mantener la fijación foveal de las imágenes durante los movimientos de la cabeza. Cuando existe una entrada vestibular asimétrica, debido a que el aparato vestibular de un lado es más defectuoso que el del otro, pueden ocurrir alteraciones en este reflejo.[34].
4. El cuarto mecanismo que puede causar nistagmo es la pérdida visual en uno o ambos ojos. La transmisión neural de una imagen clara durante la primera década de vida es fundamental para la estabilidad de la posición ocular.[2].

### 2.1.3. Características clínicas

El nistagmo es una condición en la que los ojos se mueven de manera involuntaria y oscilante alrededor de uno o más ejes. Por lo general, es un fenómeno bilateral y conjugado, lo que implica que afecta a ambos ojos de manera equitativa.[14].

Este movimiento ocular rítmico se compone de dos fases: una de desplazamiento hacia un lado y otra de retorno. Si estas fases difieren en velocidad, se clasifica como nistagmo de tipo resorte, donde el desplazamiento hacia un lado es más rápido que el de retorno. En cambio, cuando ambas fases tienen velocidades simétricas, se clasifica como nistagmo pendular (ver Figura 2-1).

**Figura 2-1.:***Nistagmo en resorte y un nistagmo pendular*

**Nota.** Nistagmo pendular, cuando las dos fases son simétricas en su velocidad, y nistagmo en resorte, cuando son asimétricas, de manera que un lado es más rápido que al lado opuesto.

El movimiento ocular involuntario del nistagmus puede ocurrir a lo largo de diferentes ejes. Puede ser un movimiento vertical, con oscilaciones hacia arriba y hacia abajo, siguiendo un eje horizontal. También puede ser un movimiento horizontal, con oscilaciones hacia la derecha y hacia la izquierda, siguiendo un eje vertical. Incluso puede ser una combinación de ambos, dando lugar a un movimiento circular.

Además, el eje de oscilación puede variar según el enfoque de la mirada de la persona. Por ejemplo, el nistagmus puede ser vertical cuando la mirada está dirigida hacia abajo, pero horizontal cuando la mirada está en posición neutra. [2].

Por último, cabe destacar que el tipo de nistagmus más común es el de eje horizontal, con el movimiento ocular oscilando de manera horizontal.

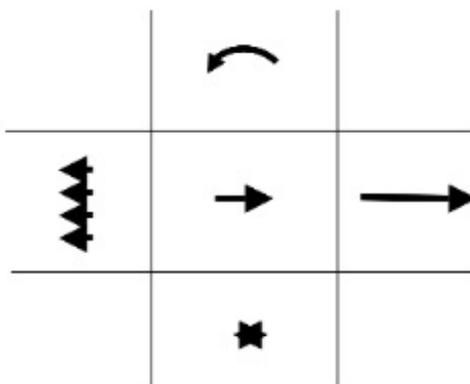
La dirección del nistagmo suele estar relacionada con la dirección de la mirada de la persona. En el caso del nistagmo en resorte, la amplitud de la oscilación tiende a incrementarse cuando la mirada se dirige hacia el mismo lado que el componente rápido del movimiento ocular. Este fenómeno se conoce como la ley de Alexander.[19].

Hay un tipo específico de nistagmo conocido como alternante periódico, en el que la dirección del movimiento, la posición de la mirada donde el nistagmo es más pronunciado y la posición de bloqueo se alternan a lo largo de un ciclo que generalmente dura unos pocos minutos. Este fenómeno es más común de lo que se suele pensar, por lo que a menudo es necesario extender la observación del nistagmo durante varios minutos para detectarlo (ver Figura 2-2).

- La amplitud se refiere al recorrido que hacen los ojos en cada fase del movimiento oscilatorio.
- La frecuencia es el número de oscilaciones por segundo.
- La intensidad del nistagmus se calcula como el producto de la amplitud por la frecuencia.

**Figura 2-2.:**

*Representación gráfica características del nistagmo*



**Nota.** La dirección del nistagmo se representa mediante la punta de la flecha, la amplitud se indica por la longitud de la flecha y la frecuencia por el número de flechas o por su grosor. Si el movimiento es torsional, la línea recta de la flecha se sustituye por un arco.

La magnitud, el trazado y la frecuencia del nistagmo pueden variar de un día a otro. Además, la magnitud del nistagmo puede disminuir con la edad. La zona neutra o zona de bloqueo es aquella posición de la mirada en la que el nistagmo es mínimo o está ausente. Esta zona puede encontrarse en miradas excéntricas, en posición primaria o en convergencia. El nistagmo cambia de dirección a ambos lados de la zona neutra.[25]

#### 2.1.4. Métricas cuantitativas del nistagmo

##### 1. Velocidad de las oscilaciones oculares:

- La velocidad de fase lenta (slow phase velocity, SPV) es una medida clave que refleja el funcionamiento del sistema vestibular.
- Parámetros como el valor máximo de SPV, la duración media de la fase lenta y la aceleración de la fase lenta proporcionan información sobre la disfunción vestibular.

- Alteraciones en la SPV se observan en trastornos como el vértigo posicional paroxístico benigno y el síndrome de Ménière.

## 2. **Amplitud de las oscilaciones oculares:**

- La amplitud de los movimientos oculares durante el nistagmo indica la magnitud de la respuesta vestibular.
- Métricas como el rango de desplazamiento ocular (grados) y la excursión máxima de los ojos pueden ayudar a diferenciar entre diferentes tipos de nistagmo.
- Cambios en la amplitud se asocian con afecciones como la esclerosis múltiple y lesiones del tronco encefálico.

## 3. **Frecuencia de las oscilaciones oculares:**

- La frecuencia de los movimientos sacádicos del nistagmo (número de ciclos por segundo) refleja la actividad del sistema oculomotor.
- Alteraciones en la frecuencia del nistagmo se observan en trastornos vestibulares y neurológicos.
- La medición de la frecuencia es útil para el diagnóstico diferencial y el seguimiento de la evolución de estas condiciones.

## 4. **Forma de las oscilaciones oculares:**

- El patrón de las oscilaciones oculares, ya sea sinusoidal, en dientes de sierra u otras formas, proporciona información sobre los mecanismos subyacentes del nistagmo.
- Ciertos patrones de movimiento ocular se asocian con lesiones específicas dentro del sistema nervioso central.
- El análisis de la forma de las oscilaciones puede ayudar a determinar el origen central o periférico del nistagmo.

El análisis cuantitativo de estas métricas, facilita una evaluación objetiva y reproducible del nistagmo, lo cual es fundamental para el diagnóstico, seguimiento y manejo de diversas afecciones neurológicas y vestibulares.[33]

### 2.1.5. **Técnicas de exploración/evaluación del nistagmo**

La evaluación del nistagmo se enfoca en identificar su dirección y su respuesta a la fijación visual, la desviación ocular y los cambios de posición. Por lo tanto, es necesario examinar el nistagmo espontáneo tanto con fijación visual como sin ella.

Para evaluar el nistagmo con fijación visual, se posiciona al paciente frente al examinador y se le solicita que enfoque la mirada en un punto fijo situado a aproximadamente 50 cm

de distancia. Luego, se mueve su mirada hacia adelante, derecha, izquierda, arriba y abajo, observando si aparece nistagmo. (ver Figura 2-3)

**Esto permite hacer una evaluación cualitativa del nistagmo, como determinar su dirección, amplitud y frecuencia. Sin embargo, este método tiene limitaciones, ya que depende de la percepción y experiencia del examinador.**

Es importante mantener la posición durante unos segundos en cada posición, ya que el nistagmo a veces aparece con cierta latencia. Al desviar la mirada, se debe procurar que el ángulo no sea mayor a 30 grados, ya que un ángulo mayor puede generar un nistagmo fisiológico de mirada extrema.[4]

**Figura 2-3.:**  
*Exploración del nistagmo*



**Nota.** Se coloca al paciente frente al examinador y se le pide que mire a un punto fijo a unos 50 cm de distancia.

Para suprimir la fijación visual, se pueden utilizar varios métodos, siendo el más accesible el uso de gafas de Frenzel en una habitación oscura.

Posteriormente, se vuelve a examinar el nistagmo sin fijación visual, moviendo la mirada del paciente en las cinco posiciones, pero asegurándose de que no desvíe los ojos más de 30 grados.[3]

Otros métodos para evitar la fijación incluyen la oftalmoscopia, que permite visualizar el desplazamiento retiniano, y la video-oculografía, que registra gráficamente los movimientos oculares en la oscuridad.

Por ejemplo, en la neuritis vestibular en posición primaria, el paciente presenta un nistagmo horizontal con características de patrón periférico. Sin embargo, después de 3-5 días, la fijación visual logra suprimir este nistagmo, aunque puede seguir siendo visible con las gafas de Frenzel durante 2-3 semanas.[3]

**Las técnicas convencionales de evaluación del nistagmo incluyen principalmente la exploración clínica y la electronistagmografía (ENG)**

■ **Electronistagmografía:**

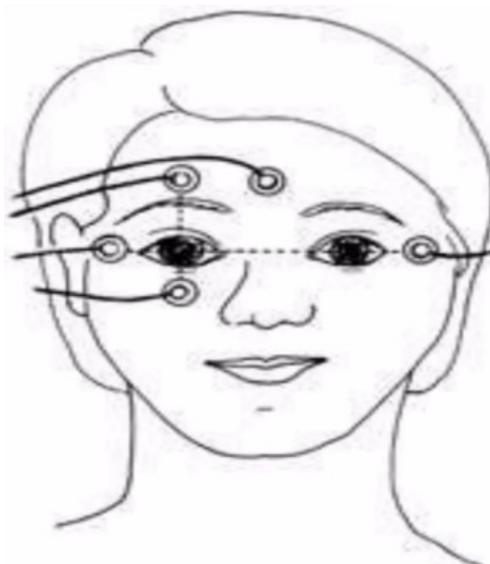
Es una técnica de evaluación neurofisiológica que permite la documentación y evaluación cuantitativa de los movimientos oculares con un enfoque particular en el nistagmo.

Utiliza electrodos situados alrededor de los ojos para detectar los cambios en los potenciales eléctricos generados por los movimientos del globo ocular (ver Figura 2-4).

Esto proporciona información objetiva sobre las características del nistagmo, como la amplitud, frecuencia, dirección y patrones de movimiento.[3]

**Figura 2-4.:**

*Electronistagmografía*



**Nota.** Utiliza electrodos colocados alrededor de los ojos para detectar los cambios en los potenciales eléctricos generados por los movimientos del globo ocular

La ENG es especialmente útil para el diagnóstico diferencial y la evaluación de trastornos del sistema vestibular y oculomotor, como vértigo, mareo, nistagmo y otros déficits en la función ocular.

Al brindar mediciones precisas de los movimientos oculares, la electronistagmografía (ENG) asiste a los profesionales de la salud en la identificación de la causa subyacente de los síntomas del paciente y a guiar el tratamiento adecuado. Es una herramienta valiosa en las áreas de neurología, la oftalmología y la otorrinolaringología.[4]

## ▪ **Protocolo de exploracion del nistagmo**

### 1. **Agudeza visual (AV)**

Es importante examinar la agudeza visual de manera monocular (con un solo ojo) y binocular (con ambos ojos), tanto en la posición primaria como en la posición de tortícolis (inclinación de la cabeza). [43]

A menudo, se obtiene una mejor agudeza visual de cerca, ya que la convergencia de los ojos disminuye el nistagmo. Incluso en casos de muy baja agudeza visual, se debe evaluar la visión a poca distancia y comprobar si el la tortícolis se mantiene constante o varía.[42]

Al medir la agudeza visual, si hay un componente de nistagmo latente, es necesario utilizar técnicas que puedan diferenciar la visión de cada ojo sin provocar el nistagmo. Algunos métodos emplean tests de visión polarizados, cristales cilíndricos o lentes positivas altas en el ojo que no se está evaluando, asegurándose de eliminar la visión sin provocar el nistagmo.[34]

### 2. **Fondo de ojo**

Se procurará descartar las causas del nistagmo sensorial. En los casos donde el nistagmo tiene un origen neurológico, se considera esencial realizar una exploración básica.

### 3. **Examen del segmento anterior**

Se llevará a cabo una retroiluminación del iris para detectar la presencia de albinismo oculocutáneo o únicamente ocular, que podría no ser evidente.

### 4. **Pruebas electrofisiológicas**

En un niño con nistagmo congénito sin causa identificable del déficit visual, se debe realizar un electrorretinograma y potenciales evocados visuales para descartar que el nistagmo tenga un origen sensorial.

### 5. **Tortícolis**

Es necesario verificar la existencia y el grado del nistagmo. Para ello, se evaluará la agudeza visual en visión binocular y se le pedirá al paciente que observe los optotipos más pequeños. Al solicitar su mejor visión, el paciente adoptará la posición de tortícolis.

## 6. Análisis del nistagmo

Se debe registrar la posición de bloqueo, si existe, y examinar el nistagmo durante varios minutos para descartar la presencia de un nistagmo alternante periódico.

Es beneficioso grabar en video el nistagmo en diversas posiciones de la mirada para analizarlo detalladamente y observar posibles variaciones y evolución. Existen dispositivos que analizan los movimientos del nistagmo, como el electronistagmógrafo o el videonistagmógrafo, así como técnicas de reflexión de luz infrarroja o video digital de alta velocidad. Aunque en la práctica solo se utilizan en investigación básica, el método considerado estándar de oro es la bobina escleral en campo magnético (scleral magnetic search coil).

El análisis del movimiento del nistagmo para observar las formas de las ondas es útil en el momento del examen, pero puede variar con el tiempo o según el grado de concentración, nerviosismo, acomodación, demandas visuales u otros factores desconocidos que estimulan el sistema nervioso central.[43]

## 7. Estudios de neuroimagen

Estas pruebas se llevarán a cabo principalmente en pacientes con una alta sospecha de patología neurológica. Los algoritmos presentados en este capítulo describen las situaciones específicas en las que se recomienda solicitar estas pruebas diagnósticas.

### 2.1.6. Interpretación de los resultados de la exploración

La exploración del nistagmo debe realizarse de manera sistemática, prestando atención a las diferentes características del mismo:

1. Es necesario observar si el movimiento ocular es conjugado, es decir, si ambos ojos se mueven simultáneamente en la misma dirección, con la misma intensidad y duración. Si alguna de estas condiciones no se cumple, el nistagmo se considera disociado.[4]
2. En cuanto a la morfología del nistagmo, este puede ser:
  - **En resorte o en sacudidas:** Se identifica una fase lenta y otra rápida en direcciones contrarias.
  - **Pendular u ondulatorio:** Se detecta un movimiento ocular de un lado a otro con igual velocidad en ambas direcciones.
  - **Irregular:** No presenta ninguna de las características mencionadas anteriormente.
3. Dirección del nistagmo:

El nistagmo puede ser horizontal, vertical, rotatorio o torsional, e incluso una combinación de estos tipos (nistagmo mixto). La dirección del nistagmo se determina por la fase rápida del movimiento ocular.

#### 4. Intensidad del nistagmo:

Se mide en grados según la ley de Alexander. El nistagmo aparece o aumenta su frecuencia al mover el ojo en la dirección de la fase rápida, lo que sugiere una patología de origen periférico.

- Grado 1: Solo se manifiesta al mirar en la dirección de la fase rápida.
- Grado 2: Se manifiesta al mirar tanto en la dirección de la fase rápida como al frente.
- Grado 3: Se manifiesta al mirar en la dirección de la fase rápida, al frente y en la dirección de la fase lenta.

#### 5. Ritmo y amplitud:

El ritmo de las oscilaciones puede ser: Bajo: Menor de una por segundo. Medio: Una o dos por segundo. Alto: Mayor de dos por segundo.

En cuanto a la amplitud, puede ser:

Pequeña: Menor de 1 mm. Media: Entre 1 y 3 mm. Grande: Mayor de 3 mm.

### 2.1.7. Limitaciones de las técnicas convencionales:

#### 1. Subjetividad en la interpretación de los resultados:

La interpretación de los patrones de nistagmo mediante electrooculografía (EOG) y videonistagmografía (VOG) implica un cierto grado de subjetividad por parte de los profesionales.[15]

#### 2. Dificultad para la cuantificación objetiva:

Estas técnicas convencionales presentan dificultades para cuantificar de manera objetiva y precisa las características clave del nistagmo, como la frecuencia, amplitud y patrones de movimiento.

#### 3. Requisitos de equipamiento especializado:

La aplicación de estos métodos requiere el uso de equipos especializados y personal capacitado, lo que limita su accesibilidad y aplicación en entornos clínicos de rutina.

#### 4. Evaluación discontinua:

Estas técnicas no permiten evaluar los cambios en el nistagmo de manera continua y a largo plazo durante los programas de rehabilitación visual.

Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías, como los sistemas de rastreo ocular basados en visión artificial, que tienen el potencial de abordar de manera más efectiva la evaluación objetiva y cuantitativa del nistagmo.[7]

## 2.2. Rehabilitación visual

Son procedimientos clínicos fundamentados en la fisiología y neurología de la visión binocular, empleados para tratar disfunciones de la acomodación y movimientos oculares, así como para tratar la ambliopía y mejorar las condiciones sensoromotoras en pacientes estrábitos.

Además, se utilizan para ayudar a mejorar la percepción de la forma en pacientes con dificultades de aprendizaje y en aquellos con ametropías residuales después de cirugías refractivas. [31]

En realidad, las rehabilitaciones visuales son procedimientos clínicos diseñados para corregir conductas visuales deterioradas mediante la creación de nuevos esquemas de práctica visual. No se trata de métodos esotéricos, ya que su eficacia para tratar disfunciones visuales se basa en principios de la fisiología y neurología ocular.

Gunter K. Von Noorden, un profesor de gran renombre internacional en Oftalmología y Pediatría del Colegio Baylor de Medicina en Houston, Texas, considera que las terapias visuales son intervenciones clínicas no quirúrgicas cuyo objetivo es lograr una visión binocular cómoda y estable. En un sentido más amplio, todos los tratamientos no quirúrgicos se consideran formas de rehabilitación visual. [30]

Los procedimientos clínicos utilizados para mejorar la función del sistema visual comenzaron con lo que se conoce como Ortóptica. Inicialmente, este proceso de entrenamiento se empleaba para tratar el estrabismo y otras irregularidades en los movimientos oculares. Literalmente, ortóptica significa enderezar los ojos.

### 2.2.1. Importancia de la rehabilitación visual en pacientes con nistagmo

Esto se refiere a la Educación y el entrenamiento de la visión en las personas. Esto implica que el paciente aprende nuevas formas de comportamiento visual, adquiriendo nuevas habilidades que le permiten mejorar su función visual y perceptual.

Este procedimiento también se conoce como entrenamiento visual o terapia visual. Se prefiere el término rehabilitación visual, ya que las técnicas aplicadas tienen como objetivo rehabilitar o restaurar una función visual que se ha deteriorado. [39]

Los ojos forman parte del sistema visual y cada uno de ellos contiene seis músculos extraoculares estriados, además de dos músculos intraoculares ubicados en el iris y el cuerpo ciliar. [29]

Estos músculos oculares también pueden fatigarse o cansarse. Cuando esto ocurre, es necesario tratarlos mediante terapias visuales, con el objetivo de lograr que dichos músculos

vuelvan a funcionar de manera normal.

El nistagmo afecta significativamente la visión de los pacientes, provocando problemas como:

- Visión borrosa o distorsionada: Suele afectar la capacidad de enfocar correctamente la imagen en la retina, lo que reduce la agudeza visual. Pero con la rehabilitación visual a través de ejercicios y entrenamiento oculomotor puede ayudar a mejorar la agudeza visual.
- Dificultad para mantener la fijación visual: Causa movimientos oculares involuntarios que dificultan mantener una mirada fija. La rehabilitación visual entrena al paciente a desarrollar técnicas para estabilizar la mirada y reducir los movimientos oculares incontrolados.
- Reducción de la agudeza visual
- Inestabilidad visual y dificultad para enfocar
- Problemas de percepción de la profundidad y la distancia

Estos síntomas visuales afectan gravemente la calidad de vida de los pacientes, restringiendo su capacidad para realizar actividades cotidianas como leer, conducir o usar dispositivos digitales. Puede estar asociado a problemas psicológicos, como ansiedad o depresión, debido al impacto en la autonomía y la integración social de los pacientes.[28]

Los programas de rehabilitación visual para pacientes con nistagmo tienen como objetivo principal mejorar la funcionalidad visual y, en consecuencia, la calidad de vida.

Los ejercicios de rehabilitación visual tienen como objetivo mejorar la coordinación entre los movimientos de los ojos y la cabeza, lo cual es esencial para mantener una visión estable. Al mejorar la agudeza visual y la estabilidad de la mirada, el paciente con nistagmo puede desenvolverse con mayor confianza y funcionalidad en sus actividades diarias. Además, estos ejercicios ayudan a prevenir el desarrollo de problemas adicionales como estrabismo, diplopía y dificultades en la lectura.[1]

- Desarrollar estrategias de fijación visual y estabilización del gaze
- Entrenar habilidades oculomotoras y de seguimiento visual
- Mejorar la coordinación ojo-mano y la percepción de la profundidad
- Adaptar el entorno y las ayudas visuales para facilitar las actividades diarias
- Proporcionar asesoramiento y apoyo psicológico para afrontar el impacto del nistagmo

## 2.2.2. Tipos de Rehabilitación visual

### 1. Entrenamiento de la fijación visual:

Mejorar la capacidad de fijación y mantener la mirada en un punto.

- a) **Ejercicios de mirada fija:** El paciente debe mantener la mirada fija en un punto o objeto durante un período de tiempo determinado.

Se puede comenzar con períodos cortos de 5-10 segundos e ir incrementando gradualmente la duración.[39]

Se pueden utilizar diferentes tipos de estímulos, como luces, formas geométricas o imágenes de alto contraste.

- b) **Seguimiento de objetos:** El paciente debe seguir visualmente un objeto que se mueve lentamente en diferentes direcciones (horizontal, vertical, diagonal).

El objeto puede ser una luz, una bola, un puntero láser o cualquier otro elemento que capture la atención visual.

El paciente debe mantener la mirada fija en el objeto sin perderlo de vista.

- c) **Ejercicios de búsqueda visual:**

Se presentan al paciente diversos estímulos visuales (letras, números, figuras) dispersos en una pantalla o espacio.

El paciente debe localizar y fijar la mirada en un estímulo específico, ya sea de forma libre o bajo instrucciones.

Estos ejercicios pueden ir aumentando en dificultad al variar la complejidad y distribución de los estímulos.[43]

### 2. Ejercicios de movimientos oculares:

Mejorar la coordinación y control de los movimientos sacádicos y de seguimiento.

- a) **Ejercicios de vergencia:**

El paciente debe ajustar la convergencia y divergencia de sus ojos para enfocar objetos que se acercan o se alejan.

Se pueden utilizar estímulos como luces, figuras o letras que se mueven hacia adelante y hacia atrás.

El paciente debe mantener la fijación y la nitidez del objeto a medida que cambia la distancia.

- b) **Ejercicios de movimiento de la cabeza y los ojos:**

El paciente debe realizar movimientos sincronizados de la cabeza y los ojos para seguir un estímulo en movimiento.

Esto ayuda a mejorar la integración de los movimientos oculares y cefálicos.

Se pueden utilizar objetos en movimiento, como luces o punteros láser, que el paciente debe seguir con la mirada y la cabeza.[31]

### 3. Estimulación optocinética:

Estimular el reflejo optocinético y mejorar la respuesta a los movimientos visuales.

#### a) Tambor optocinético:

El paciente se coloca frente a un tambor o cilindro rotatorio que tiene patrones lineales o radiales en su superficie.

Mientras el tambor gira, el paciente debe seguir visualmente el movimiento de los patrones.

Esto genera una estimulación optocinética que induce movimientos oculares de seguimiento.

Se puede variar la velocidad y dirección de rotación del tambor para desafiar los movimientos oculares[30]

#### b) Paneles de franjas optocinéticas:

Se presentan al paciente paneles con patrones de franjas o rayas blancos y negros que se mueven en diferentes direcciones.

El paciente debe seguir visualmente el movimiento de las franjas, lo que genera una respuesta optocinética.

Estos paneles pueden ser estáticos o móviles, y se puede ajustar la velocidad y dirección del movimiento.

#### c) Estímulos optocinéticos en pantallas:

Se utiliza una pantalla o proyector para presentar patrones optocinéticos digitales.

Estos patrones pueden ser franjas, enrejados, puntos o formas geométricas en movimiento.

El paciente debe seguir visualmente el movimiento de estos estímulos en la pantalla.

La velocidad, dirección y complejidad de los patrones se pueden ajustar para adaptar la dificultad.

#### 4. Entrenamiento de la percepción de la profundidad:

Optimizar la percepción de la profundidad y la estereopsis.

##### a) Ejercicios de disparidad binocular:

Se presentan al paciente imágenes o estímulos visuales que generan disparidad binocular, es decir, una diferencia en la imagen proyectada en cada ojo.

El paciente debe practicar la fusión de estas imágenes para percibir la sensación de profundidad y distancia.

Esto puede incluir el uso de gafas 3D, estereogramas, o dispositivos de realidad virtual.

##### b) Entrenamiento con paralaje de movimiento:

Se expone al paciente a escenas o objetos en movimiento, donde los elementos más cercanos se mueven a mayor velocidad que los más lejanos.

El paciente debe aprender a interpretar esta diferencia de movimiento para percibir la profundidad y distancia.

Esto puede involucrar el seguimiento visual de objetos en movimiento o la exploración de entornos en 3D.[29]

##### c) Ejercicios de oclusión:

Se presentan al paciente escenas donde algunos objetos ocultan parcialmente a otros, generando pistas de profundidad.

El paciente debe aprender a utilizar estas señales de oclusión para inferir la posición relativa de los objetos en el espacio.[6]

Esto puede incluir la identificación de objetos superpuestos o la reconstrucción mental de escenas ocultas.

##### d) Entrenamiento con sombras y luces:

Se exploran los efectos de la iluminación y las sombras sobre la percepción de la profundidad.

El paciente debe aprender a interpretar la información de profundidad proporcionada por las sombras, los contrastes y las variaciones de iluminación.

Esto puede implicar la manipulación de la iluminación en entornos virtuales o reales.[28]

##### e) Ejercicios de tamaño relativo:

Se presentan al paciente objetos de tamaños conocidos, y el paciente debe estimar la distancia o profundidad de los mismos.

Esto se basa en la habilidad de utilizar el tamaño relativo de los objetos como una pista de profundidad.

Se pueden utilizar objetos reales, imágenes o representaciones virtuales

#### 5. Entrenamiento de la sensibilidad al contraste:

Mejorar la capacidad de percibir y discriminar diferentes niveles de contraste.

##### a) Entrenamiento con gratings de contraste:

Se presentan al paciente patrones de rayas o gratings con diferentes niveles de contraste.

El paciente debe practicar la detección y discriminación de estos patrones de contraste.

La dificultad se puede ajustar variando el contraste, la frecuencia espacial y la orientación de los gratings.[28]

##### b) Ejercicios de detección de bordes y contornos:

Se expone al paciente a imágenes o escenas que contienen bordes y contrastes sutiles.

El paciente debe identificar y seguir estos elementos de contraste para mejorar la percepción de los detalles.

Esto puede incluir la detección de bordes en escenas naturales, objetos o figuras geométricas.

##### c) Entrenamiento con enmascaramiento:

Se presenta un estímulo objetivo (como una letra o un patrón) junto con un estímulo de enmascaramiento (como ruido aleatorio o patrones de interferencia).

El paciente debe practicar la detección del estímulo objetivo a pesar del enmascaramiento, lo que mejora la sensibilidad al contraste.

La dificultad se puede ajustar variando el contraste y las características del estímulo de enmascaramiento.

##### d) Ejercicios de agudeza visual y contraste:

Se evalúa la agudeza visual del paciente mediante pruebas estandarizadas, como la prueba de Snellen o la prueba de contraste de Pelli-Robson.

Se realizan ejercicios de entrenamiento visual mejorar la nitidez y la capacidad de distinguir contrastes como la lectura de optotipos o la identificación de figuras de bajo contraste.

Esto ayuda a optimizar la percepción de detalles y contrastes en diferentes condiciones de iluminación.[30]

e) **Entrenamiento con realidad virtual y juegos interactivos:**

Se utilizan entornos virtuales y juegos interactivos que requieren una alta sensibilidad al contraste.

El paciente debe practicar la detección y discriminación de elementos de contraste en escenas y tareas dinámicas.

Esto puede mejorar la capacidad de procesamiento visual y la adaptación a diferentes condiciones de contraste.

6. **Terapia de campo visual:**

Ampliar y mejorar el campo visual.

a) **Entrenamiento de detección de estímulos:**

Se presentan al paciente estímulos visuales (como puntos de luz, figuras o letras) en diferentes ubicaciones del campo visual.

El paciente debe practicar la detección y localización de estos estímulos, con el objetivo de expandir y mejorar su campo visual.

La dificultad del ejercicio se puede ajustar mediante la duración, el contraste o la excentricidad de los estímulos.

b) **Entrenamiento de localización y seguimiento:**

Se solicita al paciente que siga con la mirada o señale la ubicación de objetos en movimiento dentro de su campo visual.

Esto ayuda a mejorar la coordinación oculomotora y la integración visuo-espacial.

Se pueden utilizar objetos reales, imágenes o estímulos virtuales en movimiento.

c) **Entrenamiento de búsqueda visual:**

Se presenta al paciente una escena o imagen con múltiples elementos, y se le pide que busque y localice un elemento específico.

Este ejercicio entrena la capacidad del paciente para explorar activamente su campo visual y detectar elementos de interés.

La dificultad puede aumentar mediante la complejidad de la escena, el tamaño o el contraste de los elementos.

d) **Entrenamiento de reconocimiento de patrones:**

Se expone al paciente a patrones visuales, formas o imágenes, y se le pide que los identifique y reconozca.

Esto ayuda a mejorar la capacidad de procesamiento visual y la integración de la información dentro del campo visual.

Se pueden utilizar estímulos de complejidad creciente, desde formas simples hasta objetos y escenas más complejas.

e) **Terapia de realidad virtual y biofeedback:**

Se utilizan entornos virtuales y sistemas de biofeedback para proporcionar al paciente un entorno de rehabilitación interactivo y adaptativo.

El paciente puede recibir retroalimentación en tiempo real sobre su desempeño y la expansión de su campo visual.

Esto permite una práctica más inmersiva y personalizada de las habilidades visuales.[25]

## 2.3. Visión artificial

La visión artificial Utiliza tanto hardware como software capturar y procesar imágenes con el fin de proporcionar orientación a dispositivos en diversas aplicaciones industriales y no industriales (ver Figura 2-5).

Aunque comparte algunos algoritmos y enfoques con la visión artificial académica, educativa, gubernamental y militar, la visión artificial industrial tiene diferentes limitaciones. Los sistemas de visión industrial necesitan una mayor robustez, fiabilidad y estabilidad, y su costo suele ser más bajo.[20]

**Figura 2-5.:**  
*Visión artificial*



**Nota.** La visión artificial es la capacidad otorgada a las máquinas y sistemas computacionales para procesar y analizar imágenes y videos digitales de manera similar al sistema visual humano.

Los sistemas de visión artificial emplean sensores digitales en cámaras industriales con óptica especializada para capturar imágenes. Posteriormente, el hardware y el software de la computadora procesan, analizan y miden diversas características para la toma de decisiones. Por ejemplo, en una cervecería, se puede utilizar un sistema de visión para inspeccionar el nivel de llenado de las botellas. El sistema toma una imagen de cada botella, la procesa y analiza para determinar si el nivel de llenado es adecuado. Si se detecta un error, el sistema rechaza y separa la botella.[40]

Además de la inspección de calidad, los sistemas de visión artificial pueden llevar a cabo mediciones objetivas, como determinar el tamaño de un agujero en una bujía o proporcionar datos de ubicación para guiar a un robot durante un proceso de fabricación.[40]

### 2.3.1. Sus principales componentes

#### 1. Sensor de imagen:

- Dispositivo que transforma la luz en señales eléctricas que representan una imagen.
- Principio de funcionamiento basado en el efecto fotoeléctrico.
- Resolución, sensibilidad y velocidad de captura.
- Tecnologías comunes: CCD (Charge-Coupled Device) o CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor), cada una con ventajas y desventajas.

#### 2. Procesamiento de la imagen:

- Conjunto de técnicas matemáticas y computacionales aplicadas a la imagen.
- Mejorar la calidad, resaltar características y preparar la imagen para análisis.
- Incluye operaciones como filtrado, ecualización, segmentación.

#### 3. Extracción de características:

- Identificación y cuantificación de propiedades relevantes de la imagen.
- Permite una representación compacta y descriptiva de la información visual.
- Características comunes como forma, color, textura, bordes, puntos de interés.
- Basado en técnicas de visión por computador y reconocimiento de patrones.

#### 4. Clasificación y reconocimiento:

- Asignación de la imagen a categorías o clases predefinidas.
- Utiliza algoritmos de aprendizaje automático, como redes neuronales, SVM.
- Requiere de conjuntos de datos etiquetados para entrenamiento y validación.

- Permite identificar objetos, rostros, escenas, patrones.

#### 5. **Toma de decisiones:**

- Proceso de selección de una acción apropiada en función de los resultados.
- Basado en lógica de decisión y conocimiento del dominio de aplicación.
- Puede controlar un proceso, navegar un robot, detectar anomalías.
- Vincula los resultados del análisis visual con acciones del mundo real.

#### 6. **Retroalimentación y aprendizaje:**

- Capacidad de algunos sistemas de mejorar su desempeño con la experiencia.
- Ajuste de modelos internos a partir de nuevos ejemplos y datos.
- Permite adaptación a nuevas situaciones y entornos.
- Basado en conceptos de aprendizaje de máquina y mejora continua.

### 2.3.2. **Identificación de desafíos y oportunidades de mejora**

#### 1. **Robustez ante condiciones cambiantes:**

El desarrollo de sistemas de visión artificial robustos y confiables en condiciones cambiantes del entorno es un desafío crucial en el avance de esta tecnología. Uno de los mayores desafíos es conseguir que los algoritmos y técnicas de procesamiento de imágenes funcionen de manera efectiva a pesar de variaciones en factores como la iluminación, la posición de la cabeza del usuario, el parpadeo u otros elementos que afectan la calidad y estabilidad de las imágenes oculares capturadas.

Para abordar esta problemática, se requieren avances significativos en áreas clave como la detección y el seguimiento robusto de los ojos, la corrección de los movimientos de la cabeza, y el diseño de algoritmos de detección del nistagmo que sean invariantes a estas condiciones cambiantes.[25]

Esto abrirá la puerta a aplicaciones más efectivas y confiables de la visión artificial en diversos campos, como la medicina, la seguridad, la robótica y más.

#### 2. **Integración clínica:**

La integración fluida de las soluciones de visión artificial en los flujos de trabajo clínicos habituales aún representa un desafío significativo, a pesar de los avances logrados con prototipos y demostraciones de viabilidad. Para alcanzar una adopción generalizada de esta tecnología en el ámbito médico, es necesario abordar una serie de aspectos clave.

En primer lugar, es necesario mejorar la facilidad de uso de estas soluciones para que puedan integrarse sin interrumpir los procesos clínicos establecidos. Asimismo,

es fundamental lograr una integración efectiva con los sistemas médicos existentes, como los registros electrónicos, a fin de facilitar su aceptación y uso por parte de los profesionales de la salud.

Adicionalmente, las soluciones deben adaptarse de manera precisa a los requisitos y protocolos específicos de los entornos de atención médica, lo cual implica considerar tanto las necesidades de los usuarios como las regulaciones vigentes. Finalmente, antes de su implementación a gran escala, es indispensable llevar a cabo una validación exhaustiva de la precisión, seguridad y eficacia de estos sistemas en escenarios clínicos reales.[9]

### 3. Mejoras en precisión y resolución:

En los últimos ocho años, se han alcanzado avances significativos en el procesamiento de imágenes y el aprendizaje automático aplicados al análisis del movimiento ocular, lo que ha permitido mejorar significativamente la precisión y resolución de las métricas clave del nistagmo, como la frecuencia, amplitud y velocidad.

Estos avances incluyen el uso de técnicas de seguimiento ocular más avanzadas, algoritmos de procesamiento de imágenes optimizados y modelos de aprendizaje automático entrenados en grandes conjuntos de datos, integrando múltiples sensores para obtener mediciones más completas y confiables. Estos progresos han sido cruciales para respaldar de manera más confiable los diagnósticos y la toma de decisiones clínicas en el abordaje de los trastornos vestibulares y oculomotores.[20]

### 4. Desarrollo de aplicaciones más accesibles:

La adopción generalizada de tecnologías de visión artificial para la evaluación del nistagmo en entornos clínicos se ha visto limitada por diversos factores, entre ellos, el alto costo de los sistemas actuales y la complejidad en su implementación y uso.

Para abordar esta problemática, es necesario promover el desarrollo de soluciones más asequibles, portátiles y sencillas de utilizar, sin requerir una infraestructura tecnológica robusta o conocimientos técnicos especializados por parte de los profesionales de la salud.

En primer lugar, el diseño de sistemas de visión artificial más económicos y compactos, que puedan funcionar con recursos informáticos limitados, permitiría que un mayor número de centros médicos y profesionales tengan acceso a estas herramientas de análisis del nistagmo.[33]

En segundo lugar, la creación de interfaces de usuario intuitivas y de fácil manejo, que minimicen la curva de aprendizaje para los usuarios, fomentaría una adopción más generalizada de estas tecnologías en la práctica clínica. Al reducir la necesidad de conocimientos técnicos especializados, los profesionales de la salud podrían integrar de

manera más fluida estas herramientas de análisis del nistagmo en sus flujos de trabajo habituales.

Finalmente, al hacer que las evaluaciones del nistagmo sean más accesibles y cómodas para los pacientes, a través de dispositivos portátiles y procesos simplificados, se incrementaría la participación y aceptación de estos análisis por parte de la población. Esto, a su vez, mejoraría la recopilación de datos relevantes y, en consecuencia, la calidad de los diagnósticos y tratamientos relacionados con trastornos oculomotores.[33]

## 2.4. Técnicas de visión artificial

### 2.4.1. Procesamiento de imágenes y videos

El procesamiento de imágenes y videos es fundamental en los sistemas de visión artificial, ya que permite extraer información útil de los datos visuales capturados.

- **Preprocesamiento de imágenes (filtrado, ecualización, normalización)**

El procesamiento de imágenes se refiere al conjunto de técnicas y algoritmos aplicados a imágenes digitales con el objetivo de mejorar, realzar, analizar o extraer información relevante. [21]

Estas operaciones incluyen filtrado, segmentación, transformaciones geométricas, ecualización de histograma, realce de bordes y conversión de espacio de color, empleando técnicas como filtros lineales y no lineales, detección de bordes, segmentación basada en umbralización o agrupamiento, transformadas en el dominio de la frecuencia y morfología matemática.

Las aplicaciones abarcan la mejora de calidad de imágenes médicas, detección y reconocimiento de objetos, patrones y texturas, análisis forense, procesamiento de imágenes y videos para sistemas de visión artificial, y compresión y codificación. Además, se consideran aspectos como el procesamiento en dominio espacial o de frecuencia, la eficiencia computacional de los algoritmos, el manejo de imágenes a gran escala y la integración con otras técnicas de visión artificial.

- **Detección y reconocimiento de objetos, patrones y eventos**

La detección de objetos en imágenes digitales implica el uso de técnicas avanzadas de visión por computador y aprendizaje automático para identificar y localizar instancias de objetos específicos, como personas, vehículos o edificios, a través de pasos como preprocesamiento de la imagen, extracción de características discriminativas, generación de propuestas de región, clasificación y predicción de cuadros delimitadores usando modelos de aprendizaje profundo, y refinamiento y post-procesamiento, con aplicaciones en áreas como sistemas de vigilancia, asistencia a la conducción, robótica, análisis de imágenes médicas y clasificación de inventarios.[37]

- **Seguimiento de objetos**

El seguimiento de objetos es una tarea fundamental en el procesamiento de imágenes y video que complementa la detección de objetos, y consiste en monitorear la trayectoria y el movimiento de instancias específicas a través de una secuencia de frames, utilizando técnicas como la asociación de detecciones para vincular las detecciones de un mismo objeto en frames consecutivos, el filtrado y predicción empleando filtros como el de Kalman para anticipar la posición futura, el mantenimiento de modelos de apariencia visual actualizados para facilitar la identificación, la aplicación de algoritmos de optimización para encontrar las asignaciones óptimas de detecciones a trayectorias, y el manejo de oclusiones y salidas de campo de visión, todo ello con aplicaciones cruciales en áreas como vigilancia, análisis de tráfico, control de procesos industriales, realidad aumentada, asistencia a la conducción y robótica, donde los avances en algoritmos y hardware han permitido importantes mejoras en la precisión y robustez de estos sistemas.[35]

- **Procesamiento de video**

El procesamiento de video es un campo amplio y fundamental que integra diversas técnicas y algoritmos orientados al análisis, manipulación y mejora de secuencias de imágenes digitales.

Entre sus principales áreas de aplicación se encuentran la codificación y compresión eficiente de video, fundamental para su transmisión y almacenamiento, el análisis y entendimiento semántico de contenido a través de métodos de visión por computador y aprendizaje profundo, la mejora y restauración de la calidad visual de videos degradados, y la edición y generación de efectos visuales avanzados.

Estos avances en el procesamiento de video han impulsado el desarrollo de sistemas inteligentes que integran capacidades de detección, seguimiento y reconocimiento de objetos, actividades y escenas, con aplicaciones cruciales en ámbitos como la vigilancia automatizada, la asistencia a la conducción, las interfaces gestuales y muchos otros.

Todo ello requiere un profundo conocimiento de diversas disciplinas, desde el procesamiento de señales hasta la optimización numérica, que se han visto impulsadas por los constantes avances en hardware y software.[32]

- **Extracción de características visuales (forma, textura, color, bordes)**

La extracción de características visuales como forma, textura, color y bordes es un paso fundamental en el procesamiento y análisis de imágenes y video, ya que permite cuantificar y representar información relevante sobre los elementos que componen una escena visual.

Diversos algoritmos, algunos clásicos como Canny, Sobel y SIFT, y otros más recientes basados en aprendizaje profundo, son empleados para extraer descriptores de estas

propiedades visuales, que luego pueden alimentar técnicas más avanzadas de visión por computador como segmentación, seguimiento de objetos, reconstrucción 3D y entendimiento de escenas, con aplicaciones cruciales en campos como robótica, vigilancia, medicina y diseño asistido por computadora. La elección de estas características depende de la tarea específica a resolver, y su extracción eficiente es clave para el desarrollo de soluciones cada vez más sofisticadas en el procesamiento y análisis de contenido visual.[26]

Se basa en el procesamiento computacional de información visual para extraer y comprender el significado de los datos capturados por sensores, lo cual es fundamental para diversas aplicaciones como robótica, vigilancia, asistencia médica, entre otras.

### 2.4.2. Reconocimiento de patrones

El reconocimiento de patrones es una técnica clave en el ámbito de la visión artificial. Esta disciplina se dedica a identificar y clasificar diversos elementos dentro de imágenes y videos, tales como objetos, formas, texturas y rostros.

Una de las aplicaciones más comunes es la clasificación de objetos, donde se asigna una etiqueta o categoría a los elementos detectados. Para lograr esto, se utilizan algoritmos de aprendizaje automático como máquinas de vectores de soporte, árboles de decisión y redes neuronales. Estos modelos requieren conjuntos de datos etiquetados para su entrenamiento, de modo que puedan aprender a reconocer patrones de manera efectiva.[42]

Otra técnica importante es la detección de objetos, que permite identificar la ubicación y el tamaño de elementos de interés dentro de imágenes y videos. Se emplean métodos como redes neuronales convolucionales, detectores basados en regiones y detectores de características, los cuales posibilitan localizar objetos, rostros, peatones, vehículos.

El reconocimiento facial es un área clave dentro del reconocimiento de patrones. Este proceso identifica y verifica la identidad de personas a partir de sus rasgos faciales, utilizando técnicas de extracción de características y algoritmos de comparación de patrones. Esto tiene aplicaciones en seguridad, vigilancia e interacción hombre-máquina.

Asimismo, el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) extrae texto de imágenes o documentos digitalizados, convirtiendo los caracteres reconocidos en texto editable. Para lograr esto, se emplean técnicas de segmentación, clasificación de caracteres y análisis de contexto. La detección de gestos y movimientos reconoce patrones de movimiento y gestos de manos, cuerpo y expresiones faciales. Esto se utiliza en interfaces de usuario natural, control de juegos y realidad aumentada, combinando técnicas de seguimiento, análisis de siluetas y modelos de movimiento.[16]

### 2.4.3. Aprendizaje profundo (deep learning)

El aprendizaje profundo es una rama avanzada del aprendizaje automático que utiliza redes neuronales artificiales con múltiples capas ocultas. Esta estructura permite que los modelos aprendan representaciones cada vez más complejas y abstractas de los datos de entrada sin necesidad de una extracción manual de características.[24]

A diferencia de otros enfoques de aprendizaje automático, el aprendizaje profundo destaca por varias características clave:

- **Representación jerárquica de características:** Las redes neuronales profundas pueden aprender a representar los datos en múltiples niveles de abstracción, desde características de bajo nivel hasta conceptos más complejos.[36]
- **Escalabilidad y capacidad de aprendizaje:** Conforme aumenta la complejidad de los datos y el tamaño de los conjuntos de entrenamiento, los modelos de aprendizaje profundo han demostrado una gran capacidad de escalar y optimizar su rendimiento.
- **Versatilidad:** El aprendizaje profundo se ha aplicado con éxito en una amplia variedad de tareas, como el reconocimiento de imágenes, el procesamiento del lenguaje natural y la detección de anomalías y la predicción de series de tiempo, entre otros.
- **Rendimiento state-of-the-art:** En numerosas tareas de referencia, los modelos de aprendizaje profundo han alcanzado resultados de última generación, superando a otros enfoques tradicionales de aprendizaje automático.[22]

Algunas de las estructuras de redes neuronales profundas más comunes incluyen las redes convolucionales (CNN) para el procesamiento de imágenes, las redes recurrentes (RNN) y las redes de memoria a corto y largo plazo (LSTM) para el procesamiento de secuencias, y las redes densamente conectadas para problemas de clasificación y regresión.

El impacto del aprendizaje profundo ha sido significativo en diversos campos, como la visión artificial, el procesamiento de lenguaje natural, la robótica, los sistemas de recomendación y el análisis de big data. Su capacidad de aprendizaje y representación de alto nivel lo ha transformado en una herramienta esencial en la era de la inteligencia artificial.[11]

### 2.4.4. Visión estereoscópica y 3D:

La visión estereoscópica y 3D se refiere a la capacidad de percibir la profundidad y la tridimensionalidad del mundo que nos rodea. Esta capacidad se basa en la forma en que nuestros ojos captan imágenes ligeramente diferentes debido a la distancia horizontal que los separa (distancia interocular).[27]

- **Disparidad binocular:** Cuando observamos un objeto, cada uno de nuestros ojos capta una imagen ligeramente desplazada del mismo. Esta diferencia entre las imágenes captadas por cada ojo se conoce como disparidad binocular y es la base de la percepción de profundidad.
- **Triangulación:** Nuestro cerebro utiliza la disparidad binocular para calcular la posición de los objetos en el espacio tridimensional. Esto le permite determinar la distancia y profundidad de los elementos que observamos.
- **Estereopsis:** La combinación de las imágenes captadas por ambos ojos en nuestro cerebro resulta en la percepción de profundidad y tridimensionalidad, conocida como estereopsis o visión estereoscópica.

Tecnologías desarrolladas para reproducir la visión estereoscópica:[27]

- **Gafas 3D:** Utilizan filtros de color, polarización o conmutación de obturadores para presentar una imagen diferente a cada ojo, creando la ilusión de profundidad.
- **Pantallas 3D autostereoscópicas:** Permiten ver contenido 3D sin necesidad de gafas especiales, mediante el uso de lentes o barreras de paralaje.
- **Realidad virtual (VR) y aumentada (AR):** Estas tecnologías emplean visualización estereoscópica para sumergir al usuario en entornos tridimensionales.

### 3. Metodología

Este sistema de visión artificial está diseñado para detectar y analizar el nistagmo durante la reproducción de un video. Utiliza las técnicas de seguimiento ocular basado en características oculares, calculando la amplitud y frecuencia del movimiento ocular, y clasificando el tipo de nistagmo en base a parámetros predefinidos. Los resultados se presentan de manera visual y numérica, brindando información valiosa sobre la condición del paciente.

Se procedió a realizar videos simulados con visión artificial para diferentes niveles de severidad del nistagmo: severo, moderado y leve. Estos videos simulan la presencia de nistagmo en distintos grados. Con estos videos se probó el código para evaluar su funcionalidad y calibración según la gravedad del nistagmo. Esto se hizo para asegurar que, al evaluar a personas reales, los resultados no presenten incoherencias.

Al no contar con personas que presentaran este índice de nistagmo para obtener los resultados deseados, se procedió a descargar videos de un sitio web. Se obtuvieron videos de cinco personas que sufrían de un índice de nistagmo severo y moderado, cada una con dos sesiones diferentes: una antes del tratamiento y otra después. Esto permitió ofrecer una comparación clara de los cambios observados durante el tratamiento de rehabilitación visual. Se colocaron los resultados más representativos de las personas con un índice de nistagmo.

Por otro lado, se realizó de la misma manera la simulación de un video utilizando visión artificial en personas que no padecían de nistagmo. Para ello, se contó con cinco personas que no presentaban este trastorno. Se les informó sobre el propósito del estudio, los motivos y el procedimiento. Con su consentimiento, se procedió a la grabación de los videos para obtener los resultados. Estos resultados confirmaron que ninguno de los individuos presentaba signos de nistagmo, corroborando así la funcionalidad del sistema.

El estudio se centra en la aplicación de técnicas de visión artificial para analizar y simular los movimientos oculares en pacientes con nistagmo. En particular, el estudio involucra la creación de videos simulados y la recopilación de datos de pacientes para evaluar y calibrar un sistema de seguimiento ocular. Este enfoque permite comparar los resultados antes y después del tratamiento de rehabilitación visual, así como verificar la funcionalidad del sistema en sujetos sin nistagmo.

Este tipo de estudio se clasifica como un estudio experimental con componentes de investigación aplicada. En los estudios experimentales, los investigadores manipulan variables para observar sus efectos en un fenómeno específico. En este caso, la manipulación consiste en la simulación de videos de nistagmo en diferentes grados y la recolección de videos de pacientes reales para evaluar la eficacia del sistema de visión artificial.

## 3.1. Selección de hardware

Para este tipo de aplicación, los requisitos de hardware deben estar orientados a manejar eficientemente el procesamiento de videos en tiempo real.

Es fundamental contar con una cámara de alta resolución y una alta tasa de cuadros por segundo. Esto permite grabar con precisión los movimientos oculares de los pacientes, para que posteriormente ese mismo video sea procesado con exactitud.

En cuanto al procesador, se utilizó una CPU de alto rendimiento, capaz de manejar los algoritmos de visión artificial y procesamiento de imágenes de manera eficiente.

### 3.1.1. Selección del lenguaje de programación

Para este estudio, el lenguaje de programación utilizado fue Python, conocido por ser de alto nivel, de propósito general y de código abierto.

Python es muy popular y se emplea en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde el desarrollo web y la inteligencia artificial hasta la ciencia de datos y la automatización. Se distingue por su sintaxis sencilla y legible, lo que facilita su aprendizaje y uso.

El software empleado para este estudio fue PyCharm, un entorno de desarrollo integrado (IDE) diseñado específicamente para trabajar con Python. PyCharm proporciona a los desarrolladores un conjunto de herramientas y funcionalidades que facilitan y optimizan el proceso de desarrollo.[5]

- **Editor de código avanzado:** PyCharm ofrece herramientas como el resaltado de sintaxis y la autocompleción, que aceleran la escritura y edición del código Python.
- **Ejecución y depuración:** PyCharm permite ejecutar y depurar el código Python de manera sencilla, lo cual es útil para realizar pruebas y asegurar el correcto funcionamiento del software.

- **Integración con control de versiones:** PyCharm se integra de manera fluida con sistemas de control de versiones, facilitando el mantenimiento de un registro ordenado de los cambios en el código durante el desarrollo.
- **Soporte para bibliotecas y frameworks:** PyCharm ofrece soporte para una amplia gama de bibliotecas y frameworks de Python, lo que resulta valioso cuando se requiere el uso de herramientas o técnicas específicas de la comunidad de Python.[12]

Al utilizar Python en conjunto con PyCharm, podrás aprovechar las fortalezas de ambos para implementar de manera eficiente y ordenada. Python te proporcionará el lenguaje de programación adecuado, mientras que PyCharm te brindará un entorno de desarrollo integrado que facilitará el proceso de escritura, prueba y refinamiento de tu código.[12]

### 3.1.2. Selección de la técnica de visión artificial

La técnica utilizada para este estudio fue el **seguimiento ocular basado en características oculares**, un método que rastrea los movimientos y la orientación de la mirada de una persona mediante el uso de cámaras y procesamiento de imágenes. La idea central es que el movimiento y la posición de ciertas características visuales del ojo, como la pupila, el reflejo de la córnea y los párpados, pueden ser detectados y analizados para inferir hacia dónde está mirando la persona.[13]

Esta técnica se utiliza ampliamente en aplicaciones como la investigación de la atención visual, la evaluación de la usabilidad, la interacción hombre-máquina avanzada y el diagnóstico médico.

**El proceso para esta técnica es la siguiente:**

- **Captura de imágenes del ojo:** Se utilizan cámaras, para capturar la imagen del ojo del usuario a una alta tasa de muestreo (30-60 cuadros por segundo).
- **Detección de características oculares:** En cada imagen, se emplean algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes para identificar y localizar características oculares clave, como la pupila, el reflejo de la córnea y los bordes de los párpados.
- **Seguimiento del movimiento:** A medida que el ojo se mueve, el sistema rastrea el desplazamiento de estas características oculares a través de las imágenes sucesivas.
- **Cálculo de la mirada:** Utilizando modelos matemáticos y geométricos, el sistema traduce el movimiento de las características oculares en la posición y dirección de la mirada del usuario.[13]

Las principales ventajas de esta técnica son que es no invasiva, permite un seguimiento en tiempo real a alta velocidad y puede usarse en entornos naturales.

Sin embargo, presenta limitaciones como la sensibilidad a la iluminación y la necesidad de calibración individual.

### 3.1.3. Técnica de captura de videos de los movimientos oculares

Es una técnica que se utiliza para capturar y examinar los movimientos oculares mediante cámaras de video de alta resolución y programas informáticos especializados. Este enfoque se aplica en campos como la neurociencia, la psicología, la oftalmología y la visión por computadora, con el propósito de investigar cómo los ojos reaccionan ante diferentes estímulos visuales o cognitivos.[41]

- **Equipamiento adecuado:** Utilizar un sistema de seguimiento ocular que permita registrar con precisión los movimientos oculares del paciente.
- **Entorno controlado:** Realizar las grabaciones en una habitación tranquila y bien iluminada para minimizar distracciones y conseguir una señal de video de alta calidad.[38]
- **Preparación del paciente:** Explicar el procedimiento al paciente y obtener su consentimiento. Asegurarse de que esté cómodo e indicarle que mantenga la cabeza lo más inmóvil posible durante la grabación.
- **Metodología de la grabación:** Colocar el dispositivo a una distancia cómoda y adecuada para el paciente, generalmente entre 40-60 cm. Asegurarse de que el paciente esté sentado en una posición estable y cómoda, manteniendo la cabeza lo más inmóvil posible.[41]

## 3.2. Proceso del sistema de visión artificial

El código procesa un video para detectar y analizar el nistagmo mediante la identificación de ojos en cada cuadro (frame), el cálculo de la amplitud y la frecuencia del movimiento ocular, y la clasificación de la severidad del nistagmo. Los resultados se visualizan en tiempo real y se imprimen al finalizar el análisis.

### 1. Importación de librerías

- **cv2:** Esta biblioteca se utilizó para todas las operaciones relacionadas con la manipulación de videos, así como para la detección de características, como los ojos.

- **numpy:** Esta biblioteca se utilizó para calcular las estadísticas de las amplitudes de los movimientos oculares.
- **time:** Esta biblioteca se utilizó para medir el tiempo entre los movimientos oculares y calcular el período y la frecuencia

## 2. Modelo de detección de ojos

- **CascadeClassifier:** El clasificador Haar Cascade utiliza una serie de características Haar para detectar objetos (en este caso, los ojos) en un video. Estas características Haar se utilizaron para detectar patrones simples de píxeles en áreas blancas y negras que se pueden combinar para detectar bordes, líneas y otros patrones en una imagen.

## 3. Cargar el video:

- **video\_path:** Se utilizó para especificar la ubicación de la ruta del archivo de video.
- **cv2.VideoCapture:**  
Se utilizó para abrir y procesar un archivo de video especificado por **video\_path**.

## 4. Inicializar Variables para la Detección de Nistagmo

- **eye\_amplitude:** Esta variable se utilizó para almacenar la amplitud del nistagmo detectado.
- **all\_amplitudes:** Es una lista utilizada para almacenar todas las amplitudes de nistagmo detectadas a lo largo del análisis del video.

Esta lista se llena con las amplitudes calculadas en cada fotograma del video. Al final del análisis, esta lista permite calcular un promedio general de las amplitudes de nistagmo detectadas, lo cual es útil para determinar la severidad del nistagmo en el paciente.

- **nystagmus\_ranges:** Es un diccionario que define los rangos de amplitud utilizados para clasificar la severidad del nistagmo.

Este contiene las categorías de nistagmo (leve, moderado, severo) y los rangos de amplitud correspondientes a cada categoría. (ver Tabla 3.1)

## 5. Tabla de valores segun su nivel de nistagmo

**Tabla 3-1.:** Tabla de valores segun su nivel de nistagmo

Parámetro del Nistagmo	Leve	Moderado	Severo
Amplitud (grados)	2 - 10	10 - 20	> 20
Frecuencia (Hz)	> 2	2 - 4	> 4
Índice de Nistagmo	> 25	25 - 85	> 85

## 6. Variables para Medir el Periodo y la Frecuencia

- **start\_time:** Se utilizo para registrar el momento en que se detecta una nueva posición del ojo, iniciando así la medición del período de movimiento.
- **end\_time:** Se utilizo para registrar el momento en que se detecta un cambio en la posición del ojo, completando así la medición del período de movimiento.
- **eye\_movement\_period:** Calcula la duración del movimiento del ojo entre dos posiciones detectadas multiplicando el intervalo de tiempo por 10 para obtener el periodo en segundos.
- **eye\_movement\_frequency:** Almacena la frecuencia del movimiento ocular en Hz. Calcula la frecuencia del movimiento ocular como el inverso de la duración del periodo de movimiento.
- **previous\_eye\_position:** Esto permite determinar si habido un cambio en la posición, lo que indica un nuevo movimiento ocular. Almacena la posición anterior del ojo y se utiliza para compararla con la posición actual del ojo.
- **total\_period:** Acumula la suma de todos los periodos de movimiento ocular detectados. Esta acumulación se utilizo para calcular el periodo promedio del movimiento ocular al final del análisis del video.
- **num\_periods:** Cuenta el número de periodos de movimiento ocular detectados. Este conteo se utiliza junto con el **total\_period** para calcular el periodo promedio del movimiento ocular.

## 7. Bucle Principal

### a) Leer un frame del video:

- **video.read():** Esta función se utilizó para leer cuadros (frames) de un video de manera secuencial.
- **cv2.cvtColor:** Se convierte el cuadro (frame) a escala de grises para mejorar la detección de objetos.

El proceso implica transformar una imagen, que normalmente está en formato RGB o BGR, a un formato donde cada píxel tiene un solo valor que representa su intensidad luminosa. El resultado es una nueva imagen en la que los colores son representados por tonos de gris, lo que simplifica el procesamiento y análisis de la imagen al eliminar la información de color y trabajar únicamente con la intensidad luminosa de cada píxel.

**b) Detectar los ojos:**

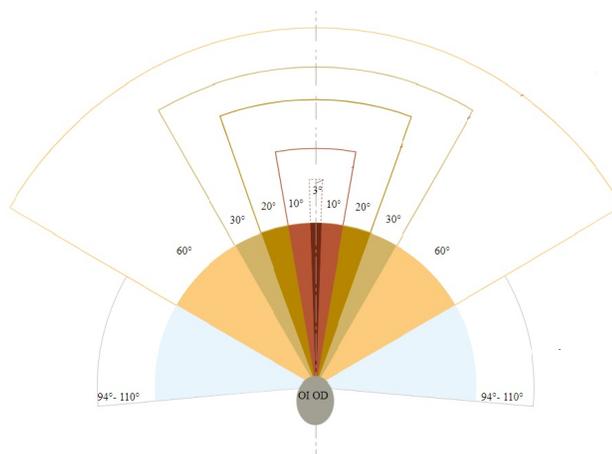
- **eye\_cascade.detectMultiScale:** Se utilizó el clasificador en cascada, previamente entrenado con datos positivos y negativos, para identificar y localizar los objetos, en este caso, los ojos en una imagen. La detección se realizó en múltiples escalas, lo que significa que el método puede detectar objetos que aparecen en diferentes tamaños dentro de la imagen, permitiendo una detección robusta y precisa.

**c) Calcular la amplitud del nistagmo:**

- El cálculo de la amplitud del nistagmo se realiza utilizando la dimensión horizontal del área detectada del ojo en un frame del video. La amplitud del nistagmo se expresa en grados, y se asume un factor de conversión de 0.1 grados por píxel para convertir esta medida. La fórmula que utilice es  $a = eye[x] \times 0,1 \text{grados por píxel}$  donde x es la dimensión horizontal del área detectada del ojo. (ver figura 3-1)

**Figura 3-1.:**

*Amplitud en Grados del Ojo*



**Nota.** Adaptado de American Academy of Ophthalmology [Fotografía], por Jay WM, 2022, INTERNET ARCHIVE

d) **Determinar el tipo de nistagmo:** Implica recorrer los rangos predefinidos de amplitud y clasificar el nistagmo según la amplitud calculada. Se compara con diferentes rangos de amplitud predefinidos para clasificar el nistagmo en diferentes categorías de severidad: leve, moderado y severo.

e) **Medir el periodo y la frecuencia de movimiento del ojo:**

Para calcular el período y la frecuencia del movimiento ocular, el algoritmo primero determina la posición del ojo en cada fotograma del video.

Si es la primera vez que se detecta el ojo, se registra el tiempo de inicio y se guarda la posición del ojo. En cada frame subsiguiente, el algoritmo compara la posición actual del ojo con la posición anterior.

Si detecta un cambio en la posición, se registra el tiempo de finalización del movimiento.

El período se calcula como la diferencia entre el tiempo de inicio y el tiempo de finalización del movimiento, representando el tiempo que le toma al ojo desplazarse de una posición a otra.

La frecuencia del movimiento ocular se obtiene como el inverso del período calculado, es decir,  $frecuencia = 1 / período$ , lo que representa cuántos movimientos oculares ocurren en un segundo.

A lo largo del video, el algoritmo suma todos los períodos calculados y cuenta el número de cambios de posición del ojo para obtener un promedio del período y la frecuencia de los movimientos oculares.

Al final del proceso, se imprimen el período promedio y la frecuencia promedio del movimiento ocular, proporcionando una evaluación cuantitativa de la dinámica del movimiento ocular detectado en el video.

## 8. Calcular el Promedio General y Determinar el Tipo de Nistagmo

- **np.mean(all\_amplitudes):** En esta función se calcula el promedio de todas las amplitudes de nistagmo detectadas, almacenadas en la lista **all\_amplitudes**.

La función **np.mean()** Toma esta lista y calcula su media aritmética, es decir, la suma de todos los valores dividida por el número de valores. Este promedio representa una medida central de la amplitud del nistagmo a lo largo del video.

Las amplitudes de nistagmo detectadas se almacena en **overall\_average**.

- **determine\_nystagmus\_type:** Esta función se utilizó para determinar el tipo de nistagmo basado en la amplitud promedio calculada.

La función recibe la amplitud promedio como entrada y recorre los rangos pre-definidos de amplitud, definidos en **nystagmus\_ranges**. Compara la amplitud promedio con estos rangos para clasificar el nistagmo en categorías como 'Leve', 'Moderado' o 'Severo'. Finalmente, devuelve el tipo de nistagmo y el valor promedio correspondiente.

- **average\_period** y **average\_frequency**: Estas variables se utilizan para calcular el periodo promedio y la frecuencia promedio del movimiento ocular. **average\_period** se calcula como la suma de todos los periodos de movimiento ocular **total\_period** dividida por el número de periodos **num\_periods**. Representa el tiempo promedio que tarda el ojo en completar un ciclo de movimiento. **average\_frequency** es el inverso del periodo promedio. Se calcula como  $1 / \text{average\_period}$  y representa cuántos ciclos de movimiento ocular ocurren por segundo en Hz.
- **nystagmus\_index**: Esta variable se utilizó para calcular el índice de nistagmo como el producto de la amplitud promedio del nistagmo y la frecuencia promedio del movimiento ocular.

Este índice proporciona una medida compuesta que refleja tanto la amplitud del nistagmo como la frecuencia de los movimientos oculares. Se calcula multiplicando la amplitud promedio **overall\_average** por la frecuencia promedio **average\_frequency**. El índice de nistagmo más alto indica una mayor severidad del nistagmo, combinando la extensión del movimiento ocular con la rapidez de los movimientos.

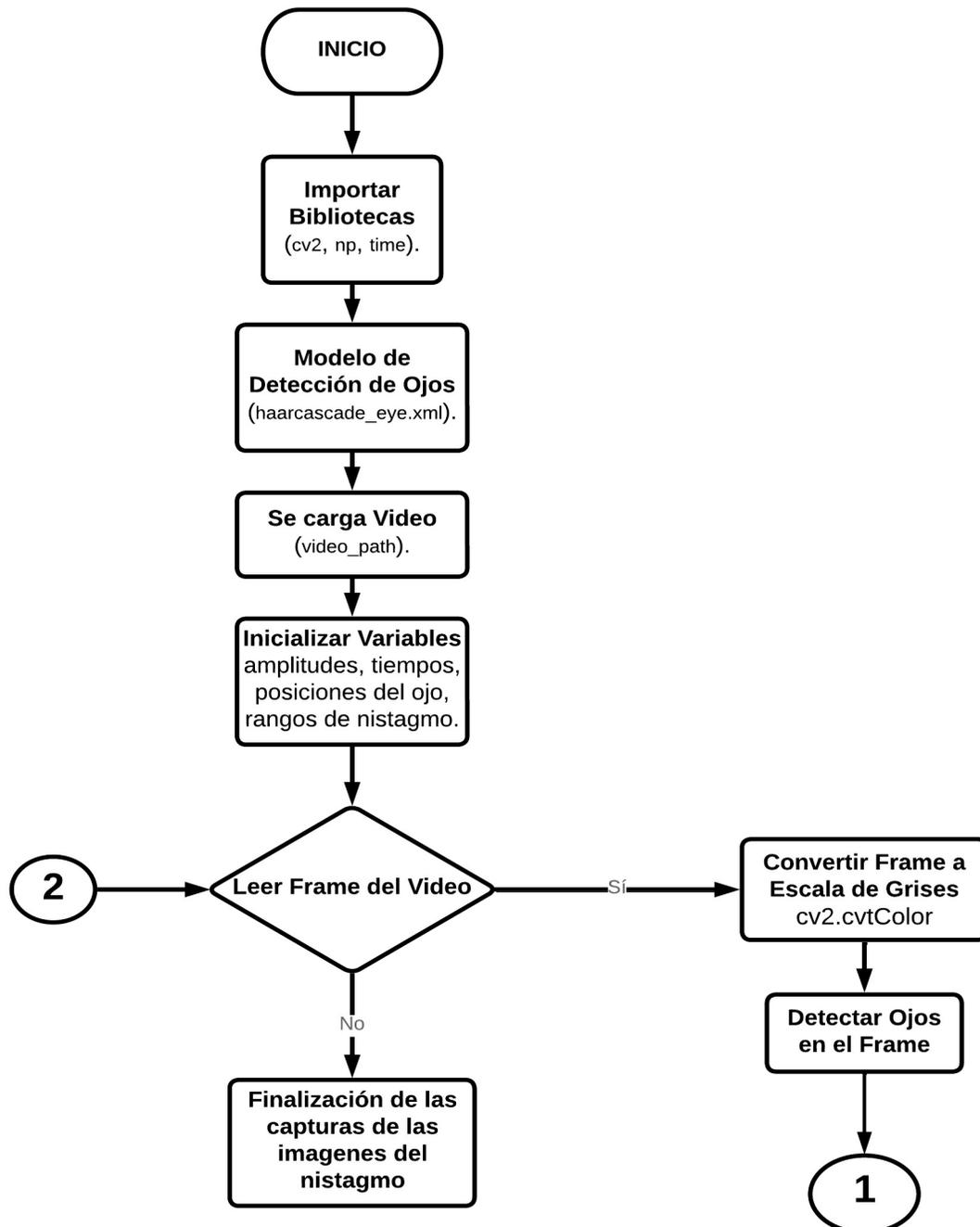
## 9. Impresión de Resultados y Liberar Recursos

- Se imprime los resultados del índice de nistagmo con colores diferentes según la gravedad (leve, moderado, severo).
- Se imprime los promedios generales de amplitud, periodo y frecuencia.
- **video.release()** y **cv2.destroyAllWindows()**: En este caso se cierran los recursos utilizados, como el video y las ventanas de visualización. (ver figura 3-2,3-3)

### 3.3. Proceso del sistema de visión artificial

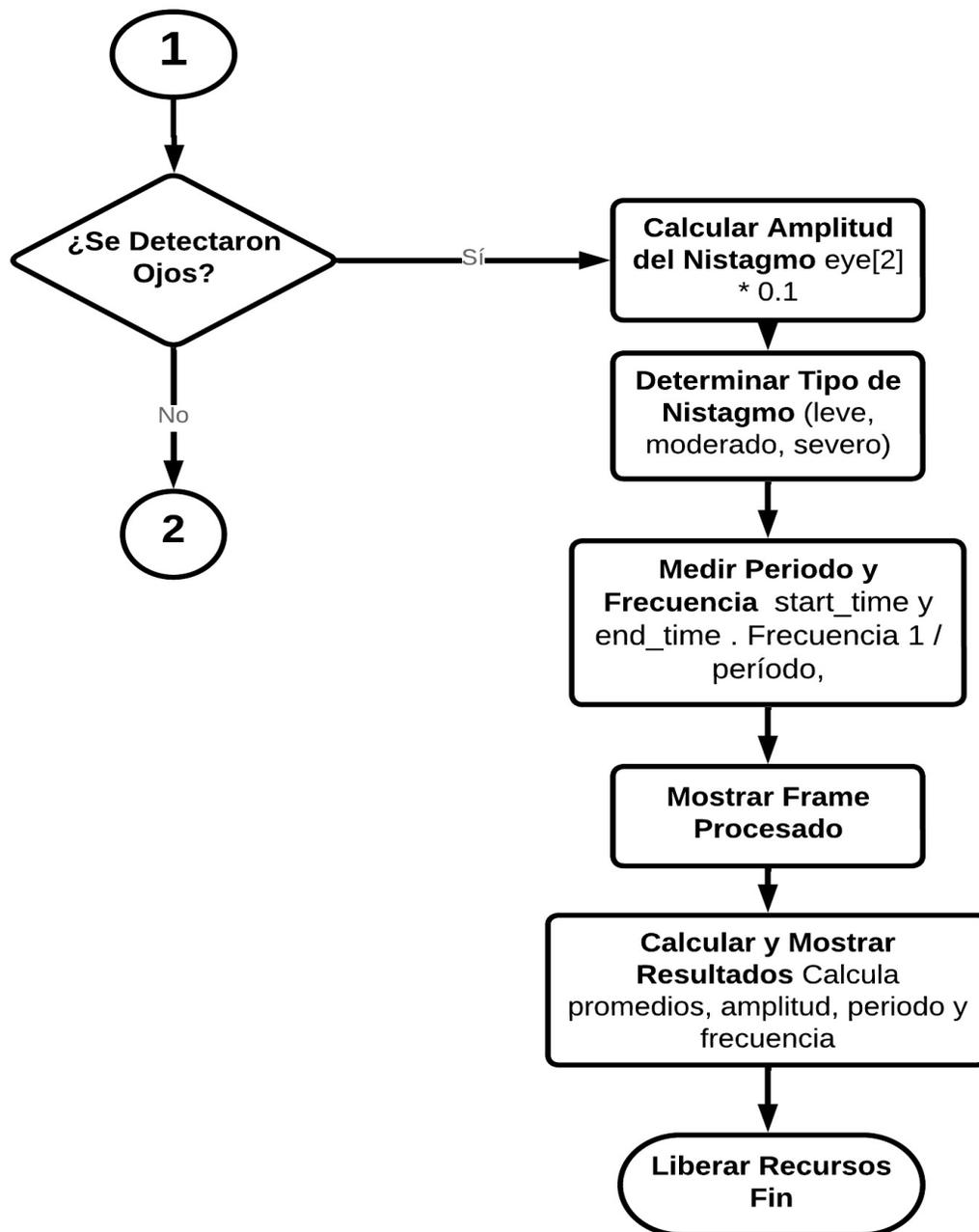
Figura 3-2.:

Sección 1 del Proceso del sistema de visión artificial



*Nota.* El diagrama de flujo ilustra el proceso para la medición del índice de nistagmo

**Figura 3-3.:**  
*Sección 2 del Proceso del sistema de visión artificial*



*Nota.* El diagrama Tabla 3-1de flujo ilustra el proceso para la medición del índice de nistagmo

## 4. Resultados y discusión

Los resultados se obtuvieron al realizar el estudio a personas adultas que padecen de nistagmo.

En la primera evaluación, se observó que los valores de amplitud y frecuencia de los pacientes eran demasiado altos. En la segunda evaluación, se notó una mejora considerable en algunos pacientes, sin embargo, en otros pacientes, los resultados se mantuvieron casi iguales.

Además, se realizó el estudio en cinco personas que no padecían de nistagmo con el fin de verificar la funcionalidad del sistema. El sistema no detectó ningún parámetro anormal, como altos niveles de amplitud y frecuencia.

Este proceso de probar el sistema tanto con personas que padecen de nistagmo como con aquellas que no lo padecen permitió asegurar su confiabilidad y precisión, demostrando que es capaz de diferenciar correctamente entre individuos con y sin la condición en cuestión.

### 4.1. Fase de Evaluación del Funcionamiento

En esta fase, se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento del sistema de visión artificial. Para las pruebas, se crearon movimientos oculares artificiales con el fin de evaluar la funcionalidad del sistema. Se generaron cuatro videos simulados mediante inteligencia artificial, representando los siguientes niveles: leve (Figura 4-1), moderado (Figura 4-2), severo (Figura 4-3) y normal (Figura 4-4). Estos videos simulan la presencia de nistagmo en distintos grados, así como un caso sin nistagmo. Se probó el código para evaluar su funcionalidad y calibración según la gravedad del nistagmo. Esto se hizo para asegurar que, al evaluar a personas reales, los resultados no presenten incoherencias.

Finalmente, se recopilaron datos de los videos simulados durante la utilización del sistema, tales como la amplitud, el periodo, la frecuencia y el índice de nistagmo.

**Figura 4-1.:**

*Resultado del video patron nivel Severo*

```
Índice de Nistagmo: 162.43 (Severo)
Promedio general de la amplitud del nistagmo en el ojo: 21 grados, Tipo: Severo
Promedio general del periodo de movimiento del ojo: 0.13 segundos
Frecuencia del promedio general del periodo de movimiento del ojo: 7.68 Hz
```

**Nota.**La imagen indica el resultado de un video con un patrón de nivel severo.

**Figura 4-2.:**  
*Resultado del video patron nivel moderado*

```
Índice de Nistagmo: 29.54 (Moderado)
Promedio general de la amplitud del nistagmo en el ojo: 20 grados, Tipo: Moderado
Promedio general del período de movimiento del ojo: 0.66 segundos
Frecuencia del promedio general del período de movimiento del ojo: 1.51 Hz
```

*Nota.* La imagen indica el resultado de un video con un patrón de nivel moderado.

**Figura 4-3.:**  
*Resultado del video patron nivel leve*

```
Índice de Nistagmo: 15.85 (Leve)
Promedio general de la amplitud del nistagmo en el ojo: 11 grados, Tipo: Moderado
Promedio general del período de movimiento del ojo: 0.66 segundos
Frecuencia del promedio general del período de movimiento del ojo: 1.50 Hz
```

*Nota.* La imagen indica el resultado de un video con un patrón de nivel leve.

**Figura 4-4.:**  
*Resultado del video patron normal*

```
Promedio general de la amplitud del nistagmo en el ojo: nan grados, Tipo: Normal
Promedio general del período de movimiento del ojo: 0.00 segundos
Frecuencia del promedio general del período de movimiento del ojo: 0.00 Hz
```

*Nota.* La imagen indica el resultado de un video con un patrón de nivel normal.

## 4.2. Resultados

### 4.2.1. Análisis de resultados de una persona que padece de un índice de nistagmo severo

La tabla 4-1 presenta los resultados de las mediciones de los parámetros del nistagmo para una persona con un nistagmo severo que está en proceso de tratamiento. La prueba se realizó en dos sesiones diferentes, una antes del tratamiento y otra después, ofreciendo una comparación clara de los cambios observados durante el tratamiento de rehabilitación visual. En la primera sesión antes de su tratamiento, la amplitud del nistagmo fue de 21 grados en la posición horizontal, mientras que en la segunda sesión se redujo a 11 grados.(ver Tabla 4-1).

En cuanto a la frecuencia del nistagmo, los valores aumentaron de 6.43 Hz en la primera sesión a 7.98 Hz en la segunda sesión.

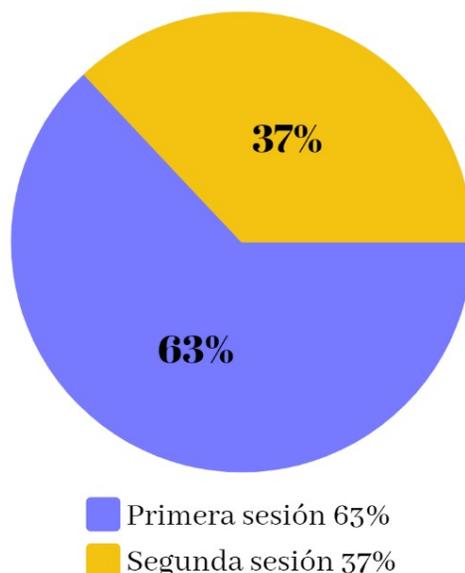
El índice de nistagmo disminuyó de 136.00 en la primera sesión a 86.76 en la segunda sesión. Esta reducción del índice es una señal positiva de que la rehabilitación visual está contribuyendo a la mejora de la condición del paciente."(ver Figura 4-5).

A pesar de estas mejoras en la amplitud y el índice del nistagmo, la clasificación de la severidad del nistagmo se mantuvo como severa en ambas sesiones. Esto sugiere que, aunque ha habido progreso, el nistagmo del paciente sigue siendo una condición grave que requiere atención continua

**Tabla 4-1.:** Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo severo

DATOS			RESULTADO TOTAL
PARAMETROS	Primera sesión	Segunda sesión	La reducción del índice de nistagmo:  37 %
<i>Amplitud (grados)</i>	21°	11°	
<i>Frecuencia (Hz)</i>	6.43Hz	7.98Hz	
<i>Índice de Nistagmo</i>	136.00 Severo	86.76 Severo	

**Figura 4-5.:**  
*Comparación de Resultados*



**Nota.** El gráfico representa la comparación de resultados de la persona con índice de nistagmo severo en su primera y segunda sección durante su tratamiento de rehabilitación visual.

### 4.2.2. Análisis de resultados de una persona que tiene un índice de nistagmo severo

La tabla 4-2 presenta los resultados de las mediciones de los parámetros del nistagmo para una segunda persona con un índice nistagmo severo que está en proceso de tratamiento. Comparando los resultados con los del primer persona, se puede observar cómo los parámetros del nistagmo han variado según su tratamiento. La prueba se realizó en dos sesiones diferentes, una antes del tratamiento y otra después, ofreciendo una comparación clara de los cambios observados durante el tratamiento de rehabilitación visual (ver Tabla 4-2).

En la primera sesión antes de su tratamiento, la amplitud del nistagmo para la persona fue de 33 grados en la posición horizontal, mientras que en la segunda sesión después del tratamiento se redujo a 7 grados.

En cuanto a la frecuencia del nistagmo, los valores aumentaron de 6.76 Hz en la primera sesión a 8.56 Hz en la segunda sesión.

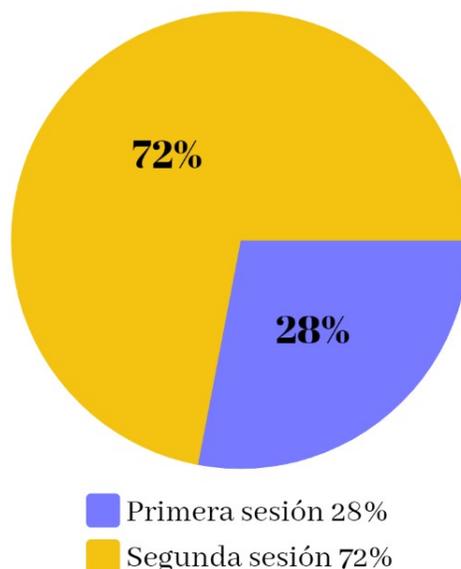
El índice de nistagmo disminuyó de 223.42 en la primera sesión a 62.99 en la segunda sesión. Esta notable reducción muestra una mejora significativa, indicando que la rehabilitación visual está contribuyendo de manera efectiva a la mejora de la condición de la persona. (ver Figura 4-6).

La clasificación de la severidad del nistagmo cambió de severo en la primera sesión a moderado en la segunda sesión. Este cambio en la clasificación indica una mejora sustancial en la condición de la persona, que ha pasado de tener un nistagmo severo a uno moderado gracias al tratamiento.

**Tabla 4-2.:** Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo severo

DATOS			RESULTADO TOTAL
PARAMETROS	Primera sesión	Segunda sesión	La reducción del índice de nistagmo:  72 %
<i>Amplitud (grados)</i>	22°	7°	
<i>Frecuencia (Hz)</i>	6.76Hz	8.56Hz	
<i>Índice de Nistagmo</i>	223.42 Severo	62.99 Moderado	

**Figura 4-6.:**  
*Comparación de Resultados*



**Nota.** El gráfico representa la comparación de resultados de la persona con índice de nistagmo severo en su primera y segunda sección durante su tratamiento de rehabilitación visual.

### 4.2.3. Análisis de resultados de una persona que tiene un índice de nistagmo moderado

La tabla presenta los resultados de las mediciones de los parámetros del nistagmo para una persona con un índice nistagmo moderado que está en proceso de tratamiento. La prueba se realizó en dos sesiones diferentes, una antes del tratamiento y otra después, ofreciendo una comparación clara de los cambios observados durante el tratamiento de rehabilitación visual.(ver Tabla 4-3).

En la primera sesión, la amplitud del nistagmo para la persona fue de 6 grados en la posición horizontal, y en la segunda sesión se mantuvo en 6 grados. La falta de cambio en la amplitud sugiere que la estabilidad ocular del paciente no ha variado significativamente entre las dos sesiones.

En cuanto a la frecuencia del nistagmo, los valores disminuyeron ligeramente de 8.41 Hz en la primera sesión a 8.32 Hz en la segunda sesión. Este pequeño descenso en la frecuencia puede indicar una leve mejora en la rapidez de los movimientos oculares, aunque el cambio no es considerable.

El índice de nistagmo disminuyó de 52.76 en la primera sesión a 48.96 en la segunda sesión. Aunque hubo una ligera reducción en el porcentaje, lo cual indicaría que en este caso no se pueden observar mejoras significativas (ver Figura 4-7)."

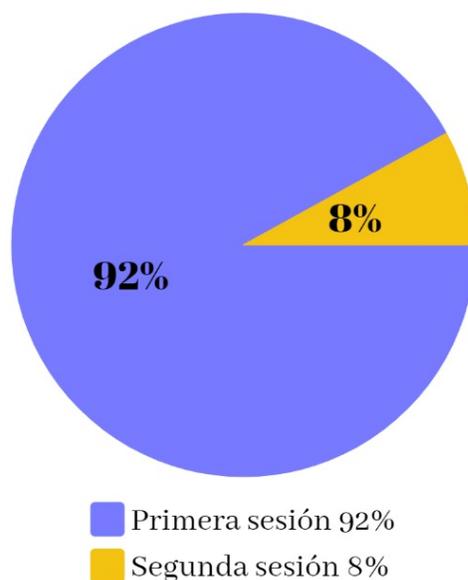
La clasificación de la severidad del nistagmo se mantuvo en moderado para ambas sesiones, indicando que, aunque ha habido una leve mejora, el nistagmo del paciente sigue siendo una condición moderada

**Tabla 4-3.:** Resultados de los videos de la Persona con índice de nistagmo moderado

DATOS			RESULTADO TOTAL
PARAMETROS	Primera sesión	Segunda sesión	La reducción del índice de nistagmo fue de:  8 %
<i>Amplitud (grados)</i>	6°	6°	
<i>Frecuencia (Hz)</i>	8.41Hz	8.32Hz	
<i>Índice de Nistagmo</i>	52.76 Moderado	48.96 Moderado	

**Figura 4-7.:**

*Comparación de Resultados*



**Nota.** El gráfico representa la comparación de resultados de la persona con índice de nistagmo moderado en su primera y segunda sección durante su tratamiento de rehabilitación visual.

Los resultados muestran que la mayoría de las personas experimentaron una disminución en el índice del nistagmo entre la primera y la segunda sección, lo que sugiere que el tratamiento de rehabilitación visual está teniendo un efecto beneficioso en la mayoría de los casos.

Sin embargo, la magnitud de la mejora varía entre las personas, lo que podría implicar la necesidad de personalizar los tratamientos para optimizar los resultados.

### 4.3. Resultados de personas que no padecen este diagnóstico

En el estudio, también se evaluaron a personas que no padecen de nistagmo, y se observó que en todos los procesos de muestreo de los videos el sistema no detectó los parámetros evaluados. Como resultado, el sistema clasificó a estas personas con un índice de nistagmo nulo.(ver Tabla 4-6).

Los datos muestran que todos los individuos evaluados tienen un índice del nistagmo clasificado como "Nulo", con una amplitud de 0 grados y una frecuencia de 0 Hz. Estos resultados confirman que todos los individuos no presentan ningún signo de nistagmo, de esta manera se ha corroborando la funcionalidad del sistema.

**Tabla 4-4.:** Resultados de los videos de personas normales

<b>Prueba</b>	<b>Índice del nistagmo</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Frecuencia</b>
Individuo 1	Nulo	0°	0 Hz
Individuo 2	Nulo	0°	0 Hz
Individuo 3	Nulo	0°	0 Hz
Individuo 4	Nulo	0°	0 Hz
Individuo 5	Nulo	0°	0 Hz

# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

El desarrollo del sistema de rastreo ocular basado en visión artificial para el análisis de los movimientos oculares en pacientes con nistagmo ha demostrado ser una herramienta efectiva para asistir en el proceso de rehabilitación visual. La implementación de tecnologías avanzadas de visión artificial ha permitido un análisis detallado y en tiempo real de los movimientos oculares, proporcionando datos valiosos para la evaluación y seguimiento de los pacientes.

Se han desarrollado y validado métodos cuantitativos para medir la amplitud, el período y la frecuencia de los movimientos oculares, los cuales han sido integrados exitosamente en el sistema, proporcionando información precisa y útil para la evaluación de la severidad del nistagmo y facilitando el seguimiento del progreso de los pacientes durante su rehabilitación.

Al comparar los resultados de la rehabilitación visual utilizando la técnica de seguimiento ocular con enfoques tradicionales, se ha notado una mejora considerable en la precisión y eficacia del tratamiento. La técnica de seguimiento ocular basada en características oculares ha mostrado ventajas claras, como la capacidad de ofrecer datos en tiempo real y una mayor sensibilidad en la detección de movimientos oculares sutiles.

A pesar de los éxitos alcanzados, es importante continuar investigando y refinando esta técnica. Futuras investigaciones podrían centrarse en mejorar la robustez del sistema en condiciones diversas, así como en integrar otros métodos complementarios de detección y análisis para mejorar la precisión y la fiabilidad de los resultados. Además, explorar la implementación de esta técnica en otros trastornos oculares podría ampliar su aplicación clínica.

## 5.2. Recomendaciones

Se recomienda integrar la técnica de seguimiento ocular basada en características oculares en la rutina de evaluación y tratamiento de pacientes con nistagmo en clínicas y hospitales. Esto permitirá una evaluación más precisa y objetiva de los movimientos oculares, facilitando intervenciones más personalizadas y efectivas.

Se recomienda fomentar la colaboración entre oftalmólogos, neurólogos, ingenieros biomédicos y especialistas en visión artificial para optimizar el diseño y la implementación de sistemas de seguimiento ocular. Esta colaboración puede conducir a innovaciones significativas y a una mejor comprensión de los mecanismos subyacentes al nistagmo.

Se recomienda utilizar los datos obtenidos del análisis de movimientos oculares para personalizar las estrategias de rehabilitación visual. Cada plan de tratamiento debe ser adaptado a las necesidades individuales de los pacientes, lo cual puede mejorar notablemente los resultados de la rehabilitación.

Se recomienda implementar programas de monitoreo a largo plazo para evaluar la evolución de los pacientes y la eficacia sostenida de las intervenciones basadas en el seguimiento ocular. Esto permitirá ajustes en los planes de tratamiento y contribuirá a una comprensión más profunda de los efectos a largo plazo de la rehabilitación visual en pacientes con nistagmo.

# A. Anexo: Código del sistema de visión artificial

```
1 import cv2
2 import numpy as np
3 import time
4
5 # Cargar el modelo de detección de ojos
6 eye_cascade = cv2.CascadeClassifier(cv2.data.harcascades + 'haarcascade_eye.xml')
7
8 # Cargar el video
9 video_path = "C:/Users/Karen/Desktop/tesiis/normal.mp4"
10 video = cv2.VideoCapture(video_path)
11
12 # Inicializar variables para la detección de nistagmo
13 eye_amplitude = 0
14 all_amplitudes = []
15
16 nystagmus_ranges = {
17     'Leve': (2, 10),
18     'Moderado': (10, 20),
19     'Severo': (20, float('inf'))
20 }
21 nystagmus_averages = {
22     'Leve': 6,
23     'Moderado': 15,
24     'Severo': 25
25 }
26
27 # Variables para medir el periodo y la frecuencia
28 start_time = 0
29 end_time = 0
30 eye_movement_period = 0
31 eye_movement_frequency = 0
32 previous_eye_position = None
33
```

```
34 total_period = 0
35 num_periods = 0
36
37 while True:
38     # Leer un frame del video
39     ret, frame = video.read()
40     if not ret:
41         break
42
43     # Convertir el frame a escala de grises
44     gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
45
46     # Detectar los ojos
47     eyes = eye_cascade.detectMultiScale(gray, scaleFactor=1.1, minNeighbors=5,
48     ↪ minSize=(30, 30))
49
50     if len(eyes) > 0:
51         # Asignar el primer ojo detectado
52         eye = eyes[0]
53
54         # Calcular la amplitud del nistagmo para el ojo
55         eye_amplitude = eye[2] * 0.1 # Suponiendo un factor de conversión de 0.1
56         ↪ grados por píxel
57         all_amplitudes.append(eye_amplitude)
58
59         # Determinar el tipo de nistagmo para el ojo
60         nystagmus_type = None
61         for type, (min_range, max_range) in nystagmus_ranges.items():
62             if min_range <= eye_amplitude < max_range:
63                 nystagmus_type = type
64
65         # Mostrar la amplitud y el tipo de nistagmo para el ojo
66         if nystagmus_type:
67             print(f'Ojo: Amplitud {eye_amplitude:.0f} grados, Tipo:
68             ↪ {nystagmus_type}')
69
70         # Medir el periodo y la frecuencia de movimiento del ojo
71         current_eye_position = (eye[0], eye[1])
72         if previous_eye_position is None:
73             start_time = time.time()
74             previous_eye_position = current_eye_position
```

---

```

73     else:
74         if current_eye_position != previous_eye_position:
75             end_time = time.time()
76             eye_movement_period = (end_time - start_time) * 10 # Multiplica
              ↳ el periodo por 10
77             if eye_movement_period > 0:
78                 eye_movement_frequency = 1 / eye_movement_period
79                 print(f"Periodo de movimiento del ojo:
              ↳ {eye_movement_period:.2f} segundos")
80                 print(f"Frecuencia de movimiento del ojo:
              ↳ {eye_movement_frequency:.2f} Hz")
81                 total_period += eye_movement_period
82                 num_periods += 1
83                 start_time = time.time()
84                 previous_eye_position = current_eye_position
85
86     # Mostrar el frame con el ojo detectado
87     cv2.imshow('Nistagmo Detection', frame)
88
89     # Presionar 'q' para salir
90     if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
91         break
92
93     # Calcular el promedio general de las amplitudes del ojo
94     overall_average = np.mean(all_amplitudes)
95
96     # Determinar el tipo de nistagmo promedio para el ojo
97     def determine_nystagmus_type(average_amplitude):
98         for type, (min_range, max_range) in nystagmus_ranges.items():
99             if min_range <= average_amplitude < max_range:
100                 return type, nystagmus_averages[type]
101         return None, 0
102
103     nystagmus_type, nystagmus_average = determine_nystagmus_type(overall_average)
104
105     # Calcular el promedio general del periodo de movimiento del ojo
106     average_period = total_period / num_periods if num_periods > 0 else 0
107
108     # Calcular la frecuencia del promedio general del periodo
109     average_frequency = 1 / average_period if average_period > 0 else 0
110
111     # Calcular el Índice de Nistagmo

```

```
112 nystagmus_index = overall_average * average_frequency
113
114 # Imprimir los resultados con diferentes colores según la gravedad del nistagmo
115 if nystagmus_index < 25:
116     print(f'\033[92mÍndice de Nistagmo: {nystagmus_index:.2f} (Leve)\033[0m')
117 elif 25 <= nystagmus_index <= 85:
118     print(f'\033[93mÍndice de Nistagmo: {nystagmus_index:.2f} (Moderado)\033[0m')
119 else:
120     print(f'\033[91mÍndice de Nistagmo: {nystagmus_index:.2f} (Severo)\033[0m')
121
122 print(f'Promedio general de la amplitud del nistagmo en el ojo:
123     → {overall_average:.0f} grados, Tipo: {nystagmus_type} ')
124 print(f"Promedio general del período de movimiento del ojo: {average_period:.2f}
125     → segundos")
126 print(f"Frecuencia del promedio general del período de movimiento del ojo:
127     → {average_frequency:.2f} Hz")
128
129 # Liberar los recursos
130 video.release()
131 cv2.destroyAllWindows()
```

# Bibliografía

- [1] ANASTASOPOULOS, L. J. ; WHITFORD, Andrew B.: Machine learning for public administration research, with application to organizational reputation. En: *Journal of Public Administration Research and Theory* 29 (2019), 6, p. 491–510. – ISSN 14779803
- [2] BAJANDAS, Frank ; KLINE, Lanning ; THOROFARE ; FARRIS, Bradley: Neuro-Ophthalmology Review Manual. En: *Journal of Neuro-Ophthalmology* 7 (2005), 12, p. 255
- [3] BRANDT, Thomas ; DIETERICH, Marianne ; STRUPP, Michael: Vertigo and dizziness: Common complaints, second edition. (2013), 01, p. 1–189. ISBN 978–0–85729–590–3
- [4] CASCON, Sara ; MORÁIS, Raquel ; ALVAREZ-OTERO, Rafael: Revisión sobre la importancia clínica del nistagmo espontáneo y de la prueba de agitación cefálica. En: *Revista ORL* (2017), 11, p. 9
- [5] CHEN, Xu ; YUEPIN, Bai ; QIANG, Guo: Design and Implementation of W-shaped Steel Band Hole Image Recognition System Based on OpenCV-Python. En: *Journal of Physics: Conference Series* 2202 (2022), 06, p. 012056
- [6] CORDES, Frederick C.: The Vertebrate Visual System, Stephen Polyak (Ed.). the University of Chicago Press, Chicago (1957), 1390, 546 illustrations, index, bibliography. Price: \$45.00. En: *American Journal of Ophthalmology* 45 (1958)
- [7] CURTHOYS, Ian S.: The Neural Basis of Skull Vibration Induced Nystagmus (SVIN). En: *Audiology Research* 11 (2021), 12, p. 557–566. – ISSN 20394349
- [8] DELLÓSSO, L. F.: Biologically relevant models of infantile nystagmus syndrome: The requirement for behavioral ocular motor system models. En: *Seminars in Ophthalmology* 21 (2006), 4, p. 71–77. – ISSN 08820538
- [9] DIEGO, Terence Cox Stephen Green Kemar E Wagle Narayani Morkos John Liu Jingyan Reith Henry Greenstein Joseph Gong Kirby Gangan Indranuj K. ; PAKHOMOV, Daniil ; HIRA, Sanchit ; KOMOGORTSEV, Oleg V. ; NEWMAN-TOKER, David E. ; WINSLOW, Raimond ; ZEE, David S. ; OTERO-MILLAN, Jorge: aEYE: A deep learning system for video nystagmus detection. (2022)

- 
- [10] DUNN, Matt J. ; MARGRAIN, Tom H. ; WOODHOUSE, J. M. ; ENNIS, Fergal A. ; HARRIS, Christopher M. ; ERICHSEN, Jonathan T.: Grating visual acuity in infantile nystagmus in the absence of image motion. En: *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 55 (2014), 3, p. 2682–2686. – ISSN 15525783
- [11] ESPINOSA, Jenny Maritza S.: Nistagmo: fisiopatología y características clínicas. (2022)
- [12] FARIAS, Bruno ; MENEZES, Rafael ; FILHO, Eddie ; SUN, Youcheng ; CORDEIRO, Lucas: ESBMC-Python: A Bounded Model Checker for Python Programs. (2024), 07
- [13] GARZÓN P., Johanna ; CLAUDIA, Bonilla ; REY, Alexandra: Avances en imágenes oculares “Polarimetría Scanning Láser”. (2011), 08
- [14] HERTLE, Richard: Examination and Refractive Management of Patients with Nystagmus. En: *Survey of ophthalmology* 45 (2000), 11, p. 215–22
- [15] HESS, Robert F. ; HOWELL, Edwin R.: The threshold contrast sensitivity function in strabismic amblyopia: Evidence for a two type classification. En: *Vision Research* 17 (2004), p. 1049–1055
- [16] ISLAM, Sumaiya ; REZA, Md N. ; SAMSUZZAMAN, Samsuzzaman ; AHMED, Shahriar ; CHO, Yeon ; NOH, Dong ; CHUNG, Sun-Ok ; HONG, Soon: Machine vision and artificial intelligence for plant growth stress detection and monitoring: A review. 6 (2024), 04, p. 33–57
- [17] LAZCANOGOMEZ, Gabriel ; FUENTESCATANO, Cynthia ; VILLANUEVAMENDOZA, Cristina: Etiología en nistagmo congénito. En: *Ruta diagnóstica Rev Mex Oftalmol; Enero-Febrero* 84 (2010), p. 49–54
- [18] LEIGH, R. J. ; SERRA, A. S.: Diagnostic value of nystagmus: spontaneous and induced ocular oscillations. (2017)
- [19] LEIGH, R. J. ; RUCKER, Janet C.: e5df9423c0acbae7de84aa6cce07bc0cf3f71f9c (1). (2020)
- [20] LI, Haibo ; YANG, Zhifan: Vertical Nystagmus Recognition Based on Deep Learning. En: *Sensors* 23 (2023), 2. – ISSN 14248220
- [21] LÓPEZ, Gabriel ; ROBALINO, Freddy ; TORRES, Paulo ; LÓPEZ, Xavier: Analysis of image processing and pattern recognition algorithms with Computer Vision. En: *Medwave* 23 (2023), 09, p. eUTA363
- [22] MA, Danqing ; DANG, Bo ; LI, Shaojie ; ZANG, Hengyi ; DONG, Xinqi: Implementation of computer vision technology based on artificial intelligence for medical image analysis. En: *International Journal of Computer Science and Information Technology* 1 (2023), 12, p. 69–76

- [23] MD, a ; DELL'OSSO, Louis F. ; HERTLE, Richard W.: 1-s2.0-S109185319970073X-main. (2018)
- [24] NAKANO, Yukari ; TERASAWA, Yasuo: Recent progress in artificial vision research. (2022), 11
- [25] NEWMAN, Jacob L. ; PHILLIPS, John S. ; COX, Stephen J. ; FITZGERALD, John ; BATH, Andrew: Automatic nystagmus detection and quantification in long-term continuous eye-movement data. En: *Computers in Biology and Medicine* 114 (2019), 11. – ISSN 18790534
- [26] NINO RONDÓN, Carlos ; CASTRO CASADIEGO, Sergio ; MEDINA DELGADO, Byron: CARACTERIZACIÓN PARA LA UBICACIÓN EN LA CAPTURA DE VIDEO APLICADO A TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL EN LA DETECCIÓN DE PERSONAS. En: *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)* 2 (2023), 07, p. 83–88
- [27] OKE, Oluwafemi ; CAVUS, Nadire: Artificial Intelligence for Computer Vision: Bibliometric Analysis. (2024), 03
- [28] ORTEGA, Rosa ; CONFORME, Lisesette ; SAAVEDRA, Dennise: Mejoramiento de la identidad visual para emprendedores. En: *Prohominum* 5 (2023), 12, p. 153–164
- [29] OVIEDO CÁCERES, María ; LUGO, Luz ; VELEZ, Marcela ; SUÁREZ ESCUDERO, Juan ; POSADA, Ana ; HERNÁNDEZ-PADILLA, Martha ; ASTUDILLO-VALVERDE, Esau ; BERNAL-RAMÍREZ, Paulina: Recomendaciones basadas en la evidencia para el diagnóstico, el tratamiento, la rehabilitación y el seguimiento de personas mayores de 7 años con baja visión. En: *Revista Mexicana de Oftalmología* 96 (2023), 01
- [30] OVIEDO CÁCERES, María ; PINEDA, Karen ; PALENCIA FLÓREZ, Diana: Rehabilitación de la baja visión: Un asunto incipiente. En: *Revista Cuidarte* 14 (2023), 04
- [31] PINERO, David: Terapia visual y TICs: diseño de programas específicos. (2015), 04
- [32] QUISPE, Joel ; MAMANI, Lalo ; HALIRE, Jaime: Proyecto Visión Artificial - Algoritmos de procesamiento de imágenes. (2021), 03
- [33] SHARPE, A ; BARBER, Hugh O. ; DELL, F: The Vestibulo-Ocular Reflex and Vertigo, edited by James Congenital and Other Types of Infantile Nystagmus: Recording, Diagnosis, and Treatment. (2020)
- [34] SLOPER, JOHN: Clinical Strabismus Management: Principles and Surgical Techniques. En: *The British journal of ophthalmology* 84 (2000), 12, p. 1333C

- [35] SOTO SOGAMOSO, Jimilgton E. ; PINTO, Jesús ; ROJAS, Edwin: Micorrizas arbusculares y las técnicas de visión artificial para su identificación. En: *TecnoLógicas* 25 (2022), 08, p. e2348
- [36] TUOMI, Ilkka ; CABRERA, Marcelino ; VUORIKARI, Riina ; PUNIE, Yves ; FORSCHUNGSSTELLE, Europäische Kommission G.: The impact of artificial intelligence on learning, teaching, and education policies for the future. (2020). ISBN 9789279972577
- [37] UNZAGA, Silvina ; DURÁN, Elena ; ÁLVAREZ, Margarita: Inteligencia Artificial en Ambientes de Aprendizaje Ubicuo: Una revisión sistemática de literatura. En: *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología* (2024), 05, p. e3
- [38] USEROS, Luis ; VILLANUEVA, Arantxa ; CABEZA, Rafael: Fisopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares. En: *Anales del sistema sanitario de Navarra, ISSN 1137-6627, Vol. 32, N<sup>o</sup>. 3, 2009 (Ejemplar dedicado a: Actualización en Neurofisiología clínica), pags. 9-26* 32 (2008), 12
- [39] VÁZQUEZ, Taimy ; GONZÁLEZ, Josefina ; PÉREZ, Joanny: Visual Impairment in School-Age Children. En: *Revista Cubana de Educacion Medica Superior* 37 (2023), 09
- [40] WINNICK, Ariel A. ; CHEN, Chih C. ; CHANG, Tzu P. ; KUO, Yu H. ; WANG, Ching F. ; HUANG, Chin H. ; YANG, Chun C.: Automated nystagmus detection: Accuracy of slow-phase and quick-phase algorithms to determine the presence of nystagmus. En: *Journal of the Neurological Sciences* 442 (2019), 11. – ISSN 18785883
- [41] YE, Yanyan ; INOUE, Tomohiro ; MAURER, Urs ; MCBRIDE, Catherine: Routledge International Handbook of Visual-motor skills, Handwriting, and Spelling: Theory, Research, and Practice. (2021), 07. ISBN 9781003284048
- [42] YI, Wu ; DENG, Wenjie ; LI, Kexin ; WANG, Xiaoting ; LIU, Bo ; LI, Jingzhen ; CHEN, Zhijie ; ZHANG, Yongzhe: A Spiking Artificial Vision Architecture Based on Fully Emulating the Human Vision. En: *Advanced Materials* 36 (2024), 02, p. e2312094
- [43] ZHANG, Wanlu ; WU, Haiyan ; LIU, Yang ; ZHENG, Shuai ; LIU, Zhizhe ; LI, Youru ; ZHAO, Yao ; ZHU, Zhenfeng: Deep learning based torsional nystagmus detection for dizziness and vertigo diagnosis. En: *Biomedical Signal Processing and Control* 68 (2021), 7. – ISSN 17468108