



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **CONTROL DE UN ROBOT MÓVIL PARA EL SEGUIMIENTO DE OBJETOS MEDIANTE REALIMENTACIÓN VISUAL**

**MARLON ANTONIO SANTAMARÍA VILLACIS**

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado  
ante el Instituto de Postgrado y Educación Continua de la ESPOCH,  
como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y  
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.**

Riobamba – Ecuador

Junio 2018

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

## CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo denominado: “Control de un robot móvil para el seguimiento de objetos mediante realimentación visual”, de responsabilidad del Ing. Marlon Antonio Santamaría Villacis ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Dr. Fredy Proaño Ortiz, PhD.

**PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D.

**DIRECTOR DE TESIS**

\_\_\_\_\_

Ing. Julio Acosta, M.Sc.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

Ing. Eddie Galarza, M.Sc.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Marlon Antonio Santamaría Villacis soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Ing. MARLON ANTONIO SANTAMARÍA VILLACIS

No. Cédula: 1803632940

©2018, Marlon Antonio Santamaría Villacis.

Se autoriza la producción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el derecho de autor.

Yo, Marlon Antonio Santamaría Villacis, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de Titulación de Maestría.

---

Ing. MARLON ANTONIO SANTAMARÍA VILLACIS

No. Cédula: 1803632940

## **DEDICATORIA**

Todo el esfuerzo puesto para lograr la presente meta está dedicado a mi amada esposa, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.

A mis queridos padres, quienes han sido mi invaluable guía desde la infancia.

Marlon A. Santamaría Villacis.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a ti Dios padre todopoderoso por este nuevo triunfo, también porque cada día bendices mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de mi bella esposa. Alejandra gracias por siempre desear y anhelar lo mejor para nuestro futuro.

Gracias a mis padres y hermanos por ser los promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas

Marlon A. Santamaría Villacis.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Portada.....</b>	<b>I</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>II</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>VI</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de contenidos.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de ilustraciones .....</b>	<b>XII</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Abstrac .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

### CAPÍTULO I

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<i>1.1. Planteamiento del problema .....</i>	<i>1</i>
<i>1.2. Formulación del problema.....</i>	<i>2</i>
<i>1.3. Preguntas directrices .....</i>	<i>2</i>
<i>1.4. Justificación .....</i>	<i>2</i>
<i>1.5. Objetivos de la investigación .....</i>	<i>3</i>
<i>1.5.1. General .....</i>	<i>3</i>
<i>1.5.2. Específicos.....</i>	<i>3</i>
<i>1.6. Hipótesis.....</i>	<i>4</i>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
<i>2.1. Antecedentes del problema.....</i>	<i>5</i>
<i>2.2. Fundamento teórico .....</i>	<i>5</i>
<i>2.2.1. Visión artificial .....</i>	<i>5</i>
<i>2.2.2. Detección de objetos en movimiento en imágenes .....</i>	<i>7</i>



2.2.2.1.	<i>Métodos basados en características del objeto</i> .....	7
2.2.2.2.	<i>Métodos basados en regiones o en contornos</i> .....	8
2.2.2.3.	<i>Detección de formas geométricas a través de la transformada de Hough</i> .....	8
2.2.3.	<i>Modelo basado en Pinhole</i> .....	10
2.2.4.	<i>Visión estéreo</i> .....	16
2.2.5.	<i>Seguimiento de objetos por visión</i> .....	18
2.2.6.	<i>Morfología de los robots móviles</i> .....	19
2.2.6.1.	<i>Configuración tipo Ackerman</i> .....	20
2.2.6.2.	<i>Configuración tipo triciclo clásico</i> .....	21
2.2.6.3.	<i>Configuración de direccionamiento diferencial o tipo unicycle</i> .....	21
2.2.7.	<i>Control de robots</i> .....	22
2.2.7.1.	<i>Seguimiento de objetos mediante telemetría</i> .....	22
2.2.7.2.	<i>Seguimiento de caminos mediante telemetría</i> .....	24

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>MODELACIÓN MATEMÁTICA</b> .....	26
3.1.	<i>Modelación del robot móvil</i> .....	26
3.1.1.	<i>Ecuaciones básicas del modelo cinemático</i> .....	26
3.1.2.	<i>Modelo cinemático considerando el punto de interés</i> .....	27
3.1.3.	<i>Modelo cinemático del robot móvil considerando la distancia desde el centro geométrico hasta el punto de interés</i> .....	29
3.2.	<i>Modelo de la estructura articular que sostiene las cámaras</i> .....	30
3.3.	<i>Modelo matemático del robot móvil y la estructura articular</i> .....	32
3.3.1.	<i>Modelo geométrico</i> .....	32
3.3.2.	<i>Modelo cinemático</i> .....	33
3.4.	<i>Modelo matemático de las cámaras</i> .....	34

### **CAPÍTULO IV**

4.	<b>DISEÑO DE SEGUIMIENTO DE OBJETOS MEDIANTE VISIÓN</b> .....	36
4.1.	<i>Diseño del sistema electrónico</i> .....	37
4.1.1.	<i>Banco de baterías y circuito de protección</i> .....	37

4.1.2.	<i>Placa electrónica de control</i> .....	38
4.1.3.	<i>Placa extensora de periféricos</i> .....	38
4.1.4.	<i>Computador</i> .....	38
4.1.5.	<i>Motores</i> .....	39
4.1.6.	<i>Cámaras</i> .....	39
4.2.	<i>Visión y adquisición de imagen</i> .....	40
4.2.1.	<i>Software usado para el tratamiento de imagen</i> .....	40
4.2.2.	<i>Adquisición de imágenes</i> .....	41
4.2.3.	<i>Librerías para conexión de las cámaras web</i> .....	41
4.2.4.	<i>Librerías para la detección de objetos</i> .....	43
4.2.5.	<i>Triangulación del objeto mediante visión estéreo</i> .....	45
4.3.	<i>Esquema de control</i> .....	48
4.3.1.	<i>Control cinemático con un punto de interés</i> .....	48
4.3.2.	<i>Control cinemático mediante realimentación visual</i> .....	50
4.4.	<i>Análisis de estabilidad del control cinemático</i> .....	51
 <b>CAPÍTULO V</b>		
5.	<b>RESULTADOS</b> .....	53
5.1.	<i>Resultados de visión artificial</i> .....	53
5.1.1.	<i>Resultados de seguimiento de objetos con una cámara</i> .....	53
5.1.2.	<i>Resultados de seguimiento de objetos con visión estéreo</i> .....	55
5.2.	<i>Resultados del control del robot móvil y estructura articular</i> .....	57
5.2.1.	<i>Resultados de simulación y experimentación considerando el punto de interés</i> .	58
5.2.1.1.	<i>Prueba de simulación No. 1 considerando el punto de interés</i> .....	59
5.2.1.2.	<i>Prueba de simulación No. 2 considerando el punto de interés</i> .....	60
5.2.1.3.	<i>Experimentación 1 considerando el punto de interés</i> .....	61
5.2.1.4.	<i>Experimentación 2 considerando el punto de interés</i> .....	64

5.2.2.	<i>Resultados de simulación y experimentación considerando el seguimiento de objetos mediante realimentación visual.....</i>	67
5.2.2.1.	<i>Prueba de simulación No. 1 considerando realimentación visual.....</i>	68
5.2.2.2.	<i>Prueba de simulación No. 2 considerando realimentación visual.....</i>	70
5.2.2.3.	<i>Experimentación 1 considerando la realimentación visual .....</i>	73
5.2.2.4.	<i>Experimentación 2 considerando realimentación visual .....</i>	77

## **CAPÍTULO VI**

6.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	82
6.1.	<i>Conclusiones .....</i>	82
6.2.	<i>Recomendaciones .....</i>	83

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

<b>ANEXOS.....</b>	<b>5</b>
--------------------	----------

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Fig. 1-2</b>	Ramas de la inteligencia artificial .....	6
<b>Fig. 2.2</b>	Fases de la visión artificial .....	7
<b>Fig. 3-2</b>	Detección de objetos basado en contornos.....	8
<b>Fig. 4-2</b>	Representación de: a) la recta en el plano xy, b) dos puntos de la recta en el espacio de parámetros.....	8
<b>Fig. 5-2</b>	Representación normal de la recta.....	9
<b>Fig. 6-2</b>	Lámina colocada directamente al frente de la imagen .....	10
<b>Fig. 7-2</b>	Cámara Pinhole .....	11
<b>Fig. 8-2</b>	Captura de un punto del espacio tridimensional en la lámina de la cámara.....	12
<b>Fig. 9-2</b>	Punto capturado por la lámina y proyectado sobre el plano X-Y.....	12
<b>Fig. 10-2</b>	Análisis de fórmulas basado en Pinhole.....	12
<b>Fig. 11-2</b>	Imagen real a través de una cámara Pinhole, imagen real a través de una cámara de lentes.....	13
<b>Fig. 12-2</b>	Uso de lentes para mejorar la definición de la imagen.....	13
<b>Fig. 13-2</b>	Desviación de rayos de luz lejanos al centro óptico.....	14
<b>Fig. 14-2</b>	Incidencia de un punto del objeto real sobre la lámina a través de un lente .....	14
<b>Fig. 15-2</b>	Relación de triángulos similares para rayos de luz cercanos del centro óptico.....	14
<b>Fig. 16-2</b>	Relación de triángulos similares para rayos de luz lejanos del centro óptico .....	15
<b>Fig. 17-2</b>	Interpretación de la visión estéreo.....	16
<b>Fig. 18-2</b>	Etapas del modelo ideal estéreo .....	17
<b>Fig. 19-2</b>	Ajuste óptico .....	18
<b>Fig. 20-2</b>	Módulos en un sistema de seguimiento para un solo blanco.....	19
<b>Fig. 21-2</b>	Robot móvil tipo car-like .....	21
<b>Fig. 22-2</b>	Robot móvil tipo triciclo .....	21
<b>Fig. 23-2</b>	Robot móvil tipo Uniciclo.....	22

<b>Fig. 24-2</b> Control de velocidad y desplazamiento lateral.....	23
<b>Fig. 25-2</b> Seguimiento de caminos.....	24
<b>Fig. 1-3</b> Parámetros a considerar en el modelamiento del robot móvil tipo unicycle .....	26
<b>Fig. 2-3</b> Parámetros a considerar en el modelamiento del robot móvil tipo unicycle .....	27
<b>Fig. 3-3</b> Posición del robot unicycle en el plano bidimensional.....	28
<b>Fig. 4-3</b> Posición del robot unicycle en movimiento (inyectándole una velocidad lineal y angular) .....	28
<b>Fig. 5-3</b> Condiciones del modelo cinemático del robot unicycle .....	29
<b>Fig. 6-3</b> Esquema del modelo matemático en función de las velocidades.....	30
<b>Fig. 7-3</b> Estructura articular que sostiene las cámaras .....	30
<b>Fig. 8-3</b> Condiciones del modelo cinemático del robot móvil y la estructura articular .....	33
<b>Fig. 9-3</b> Observación de la cámara derecha .....	35
<b>Fig. 1-4</b> Diagrama de flujo del diseño de seguimiento .....	36
<b>Fig. 2-4</b> Distribución del sistema electrónico .....	37
<b>Fig. 3-4</b> Baterías LiPo.....	37
<b>Fig. 4-4</b> Conexión lógica directa de la red de motores y matlab.....	39
<b>Fig. 5-4</b> Cámara usada para la adquisición de imagen.....	40
<b>Fig. 6-4</b> Interfaz de usuario de matlab .....	41
<b>Fig. 7-4</b> Algoritmo de la transformada circular de Hough: a) vector de acumulación, b) detector de centro del círculo.....	44
<b>Fig. 8-4</b> Detección de formas circulares con radio definido .....	45
<b>Fig. 9-4</b> Imágenes obtenidas por las cámaras: izquierda (a) y derecha (b) .....	45
<b>Fig. 10-4</b> Escalamiento a grises y ubicación del objeto en el plano u, v de ambas imágenes ....	46
<b>Fig. 11-4</b> Obtención del parámetro b para discriminar la profundidad del objeto .....	46
<b>Fig. 12-4</b> Esquema de control para seguimiento de objetos mediante visión .....	48
<b>Fig. 13-4</b> Variables inmersas en el seguimiento de trayectorias .....	49
<b>Fig. 14-4</b> Unificación de la referencia general con la referencia de la cámara .....	50

<b>Fig. 1-5</b> Detección del objeto circular con una cámara.....	54
<b>Fig. 2-5</b> Ploteo del desplazamiento del objeto detectado con una cámara.....	54
<b>Fig. 3-5</b> Detección del objeto circular con visión estéreo.....	56
<b>Fig. 4-5</b> Representación gráfica del desplazamiento tridimensional del objeto detectado con visión estéreo.....	57
<b>Fig. 5-5</b> Base móvil unida a la estructura articular simulada.....	58
<b>Fig. 6-5</b> Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés .....	59
<b>Fig. 7-5</b> Errores de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés .....	59
<b>Fig. 8-5</b> Velocidades de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés .....	60
<b>Fig. 9-5</b> Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 2 considerando el punto de interés .....	60
<b>Fig. 10-5</b> Errores de control - prueba de simulación 2 considerando el punto de interés .....	61
<b>Fig. 11-5</b> Velocidades de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés ...	61
<b>Fig. 12-5</b> Movimiento estroboscópico - experimentación 1 considerando el punto de interés...	62
<b>Fig. 13-5</b> Errores de control – experimentación 1 considerando el punto de interés .....	62
<b>Fig. 14-5</b> Velocidad de control lineal – experimentación 1 considerando el punto de interés ...	63
<b>Fig. 15-5</b> Velocidad de control angular – experimentación 1 considerando el punto de interés	63
<b>Fig. 16-5</b> Velocidad de control para la articulación 1 – experimentación 1 considerando el punto de interés.....	63
<b>Fig. 17-5</b> Velocidad de control para la articulación 2 – experimentación 1 considerando el punto de interés.....	64
<b>Fig. 18-5</b> Movimiento estroboscópico - experimentación 2 considerando el punto de interés...	64
<b>Fig. 19-5</b> Errores de control – experimentación 2 considerando el punto de interés .....	65
<b>Fig. 20-5</b> Velocidad de control lineal – experimentación 2 considerando el punto de interés ...	65
<b>Fig. 21-5</b> Velocidad de control angular – experimentación 2 considerando el punto de interés	66
<b>Fig. 22-5</b> Velocidad de control para la articulación 1 – experimentación 2 considerando el punto de interés .....	66
<b>Fig. 23-5</b> Velocidad de control para la articulación 2 – experimentación 2 considerando el punto de interés .....	67

<b>Fig. 24-5</b> Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 1 considerando realimentación visual .....	68
<b>Fig. 25-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	69
<b>Fig. 26-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual.....	69
<b>Fig. 27-5</b> Velocidades de control - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	70
<b>Fig. 28-5</b> Desplazamiento del objeto en el plano de imagen - prueba de simulación 1 considerando realimentación visual.....	70
<b>Fig. 29-5</b> Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 2 considerando realimentación a visual .....	71
<b>Fig. 30-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	71
<b>Fig. 31-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	72
<b>Fig. 32-5</b> Velocidades de control - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	72
<b>Fig. 33-5</b> Desplazamiento del objeto en el plano de imagen - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual .....	73
<b>Fig. 34-5</b> Movimiento estroboscópico - experimentación 1 considerando realimentación visual .....	74
<b>Fig. 35-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 – experimentación 1 considerando realimentación visual .....	74
<b>Fig. 36-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 – experimentación 1 considerando realimentación visual .....	75
<b>Fig. 37-5</b> Velocidad de control lineal- experimentación 1 considerando realimentación visual	75
<b>Fig. 38-5</b> Velocidad de control angular - experimentación 1 considerando realimentación visual .....	76
<b>Fig. 39-5</b> Velocidad de control para la articulación 1 - experimentación 1 considerando realimentación visual.....	76
<b>Fig. 40-5</b> Velocidad de control para la articulación 2 - experimentación 1 considerando realimentación visual .....	77

<b>Fig. 41-5</b> Desplazamiento del objeto en el plano de imagen – experimentación 1 considerando realimentación visual.....	77
<b>Fig. 42-5</b> Movimiento estroboscópico - experimentación 2 considerando realimentación visual .....	78
<b>Fig. 43-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 – experimentación 2 considerando realimentación visual .....	79
<b>Fig. 44-5</b> Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 – experimentación 2 considerando realimentación visual.....	79
<b>Fig. 45-5</b> Velocidad de control lineal- experimentación 2 considerando realimentación visual.....	80
<b>Fig. 46-5</b> Velocidad de control angular - experimentación 2 considerando realimentación visual .....	80
<b>Fig. 47-5</b> Velocidad de control para la articulación 1 - experimentación 2 considerando realimentación visual .....	80
<b>Fig. 48-5</b> Velocidad de control para la articulación 2 - experimentación 2 considerando realimentación visual.....	81
<b>Fig. 49-5</b> Desplazamiento del objeto en el plano de imagen – experimentación 2 considerando realimentación visual .....	81



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-4</b> Propiedades de una cámara web .....	42
<b>Tabla 2-4</b> Comandos para la adquisición de imagen.....	42
<b>Tabla 3-4</b> Argumentos de la función imfindcircles.....	43

## RESUMEN

El fin del presente trabajo de titulación fue el desarrollo de un sistema de control de un robot móvil para el seguimiento de objetivos mediante retroalimentación visual. Un sistema de visión monocular montado sobre un robot móvil tipo unicycle provee información limitada para tareas de seguimiento de objetos, muchas de las veces asumiendo ciertos criterios como la profundidad. Para solucionar el problema de la carencia del componente de profundidad, una composición de dos cámaras puede generar un desfase de visión para implementar sistemas de visión estereoscópica y añadir información a una imagen bidimensional. El sistema de control se basa en la modelación cinemática del sistema completo (robot móvil y estructura articular de las cámaras), así como del modelo cinemático de las cámaras. El robot móvil y la estructura articular utilizada están conformados por motores Dynamixel, descritos como actuadores inteligentes con redes de comunicación serial integrada. El diagrama de control que se presenta utiliza la modelación cinemática para determinar las velocidades adecuadas que todos los actuadores deben adoptar para el seguimiento de objetivos mediante retroalimentación visual en un ambiente estructurado. Esta propuesta se analiza mediante un simulador en Matlab que indica el correcto funcionamiento del sistema de control. Usando un prototipo de investigación, se obtienen los resultados experimentales que demuestran un adecuado funcionamiento del sistema de control para el seguimiento de objetivos mediante retroalimentación visual. Se valida el adecuado funcionamiento del mecanismo robótico y de los controladores propuestos, además las gráficas de errores y velocidades de control muestran la correcta ejecución en un entorno real. Se recomienda que el presente proyecto sea la base para proyectos futuros en los cuales se estudie el desempeño del sistema en ambientes no estructurados.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS>, <MODELACIÓN CINEMÁTICA>, <ROBÓTICA MÓVIL>, <CONTROL CINEMÁTICO>, <VISIÓN ESTEREOCÓPICA>, <RETROALIMENTACIÓN VISUAL>.

## **ABSTRACT**

The aim of the present titration work was the development of a control system of a mobile robot for the tracking of objectives through visual feedback. A monocular vision system mounted on a unicycle type mobile robot provides limited information for follow-up tasks of many times, assuming specific criteria such as depth, a composition of two cameras can generate a vision blur to implement stereoscopic vision systems and add information to a two-dimensional image. The control system based on the kinematic modeling of the complete system (mobile robot and joint structure of the cameras), as well as the kinematic model of the cameras. The mobile robot and the joint structure used are made up of Dynamixel motors, described as intelligent actuators with integrated serial communication networks. The control diagram presented uses kinematic modeling to determine the appropriate speeds that all actuators must adapt to track objectives through visual feedback in a structured environment. This proposal analyzed through a simulator in Matlab that indicates the correct functioning of the control system. Using a prototype, experimental results are obtained that demonstrate an adequate operation of the control system for the tracking of objectives through visual feedback. The proper functioning of the robotic mechanism and the proposed controllers is validated, besides the error graphs and control speeds show the correct execution in a real environment. It recommended that this project be the basis for plans in which the performance of the system in unstructured environments studied.

Keywords: <TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SCIENCE> < AUTOMATIC CONTROL> <MONITORING OF OBJECTIVES> < CINEMATIC MODELING> <MOBILE ROBOTICS> < CINEMATIC CONTROL> < STEREOCOPIC VISION> <VISUAL FEEDBACK>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

La robótica actual viene solucionando problemas que antes eran resueltos por personal humano, actividades que ponían en peligro o en situaciones tediosas a los operarios. Sin embargo, al tratar de enfocar un conjunto de sensores y actuadores a realizar una tarea que requiere de inteligencia considerablemente alta, los mecanismos de captura y procesamiento de información deben proveer la mayor cantidad de información posible para que el robot pueda desenvolverse en ambientes estructurados o no estructurados. En este contexto, la visión se muestra como uno de los sentidos más importantes que tiene un sistema inteligente, tanto para la adquisición de información del entorno como para el aprendizaje de nuevas tareas o discriminación de riesgos (Han & Daejeon, 2015). Se estima que el 80% de todo el aprendizaje, toma de decisiones y actividades que puede tener un humano proviene de la vista (Ripley & Politzer, 2010). Toda esta información visual permite que nuestro cerebro interprete de manera adecuada el entorno en el que nos desenvolvemos. Ya en la robótica, los sistemas de visión orientados a control permiten en la actualidad una amplia gama de aplicaciones, *i. e.*, asistencia, inmersión visual, reconocimiento de objetivos, seguridad, entre otros (Plósz, Kertész, Lukovszki, & Kovács, 2013), mediante lo cual se ha resuelto distintas problemáticas encontradas en la industria, en el área militar y en la robótica de servicio. Las investigaciones que se centran en control a través de imagen monocular resuelven problemas basándose en la recolección directa de datos, pero asumen criterios dada la ausencia de profundidad. Como una solución a la falta de información visual tridimensional dada por una imagen en dos planos, se plantean trabajos con la inclusión de una segunda cámara para la estimación de profundidad y volumen de objetos, a este conjunto de cámaras colocadas a una distancia y ángulo estratégicos se conoce como visión estereoscópica (Fahmy, 2013). La visión estereoscópica permite discriminar objetos por forma, color y volumen, por lo cual se tiene una solución a la navegación autónoma de vehículos terrestres y aéreos (Barry, Oleynikova, Honegger, Pollefeys, & Tedrake, 2013).

Por lo descrito en párrafos anteriores, este proyecto de investigación plantea el seguimiento de objetos a través de un vehículo móvil mediante realimentación visual afín que un vehículo tipo unicycle pueda tomar decisiones autónomas en ambientes de trabajo estructurados basadas en las características de imagen y de la velocidad de movimiento del objeto.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Es posible cerrar el lazo de control para tareas de seguimiento con un robot móvil a través de realimentación visual?

## **1.3. Preguntas directrices**

¿Qué técnicas de control existen para el seguimiento de objetos a través de visión?

¿Cómo se extrae la posición y velocidad estimada de un objeto en el plano de la imagen?

¿Cómo se usa la retroalimentación visual para el seguimiento de un objeto a través de un robot móvil tipo unicycle en un ambiente estructurado?

¿Cómo se valida experimentalmente el control basado en retroalimentación visual para el seguimiento de un objeto sobre un robot móvil tipo unicycle?

## **1.4. Justificación**

La planificación estratégica del Buen Vivir del Ecuador desde el año 2013 hasta el presente plantea impulsar la transformación de la matriz productiva, en referencia a los lineamientos donde se expresa *Promover la intensidad tecnológica en la producción primaria, de bienes intermedios y finales*, y en específico *Articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos* (SENPLADES, 2013). Por tanto, es requerido incluir toda la nueva investigación a un marco de industria para mejorar la economía del país y ampliar la matriz productiva a través del desarrollo tecnológico.

Un sistema de visión estéreo permite detectar, procesar y reenviar información valiosa que será determinante en la toma de decisiones, ya sea desde el propio sitio o un lugar remoto. El control por realimentación de visión permitirá al robot tomar decisiones autónomas cuando los sistemas

de tele-operación fallen por la dificultad del terreno o no exista ningún tipo de información de posicionamiento debido al área de trabajo (túneles o edificios colapsados) y de esta manera, seguir un objetivo móvil que se estará desplazando en un ambiente semiestructurado para labores de asistencia, rescate en situaciones catastróficas, mapeo de zonas en riesgo o de guerra, promoción de sitios turísticos, etc.

En este contexto, este trabajo de titulación se enfoca en extraer las características de imagen y la velocidad del objeto a ser seguido a través de sensores de visión para realimentar el esquema de control propuesto. El esquema propuesto será el encargado de calcular las velocidades lineal y angular requeridas para maniobrar un robot móvil afín de mantener las características del objeto dentro del plano visual del robot. Cabe destacar que este trabajo de titulación se enfoca en la realimentación visual afín de cerrar el lazo de control, más no en la implementación de nuevas técnicas de procesamiento visual por lo que únicamente se extraerá las características del objeto a ser seguido.

## **1.5. Objetivos de la investigación**

### ***1.5.1. General***

Desarrollar un esquema de control en lazo cerrado a través de realimentación visual de un robot móvil tipo unicycle para seguimiento de objetos móviles.

### ***1.5.2. Específicos***

- Definir las técnicas de control con realimentación visual que considere tanto el modelo del robot, como el del sistema de visión.
- Identificar las características del objeto a ser seguido en el plano de la imagen, afín de extraer su posición y estimar su velocidad de desplazamiento.
- Proponer un esquema de control en lazo cerrado, basado en el modelo de un robot móvil tipo unicycle como el del sistema de visión, para tareas de seguimiento de un objeto mediante realimentación visual estéreo para ambientes estructurados.
- Validar experimentalmente el control en lazo cerrado basado en realimentación visual estéreo para el seguimiento de un objeto sobre un robot móvil tipo unicycle.

*Nota: Las pruebas experimentales se realizarán sobre una de las plataformas construidas en el proyecto de investigación “Tele-operación bilateral cooperativo de múltiples manipuladores móviles”, proyecto ganador de la novena convocatoria CEDIA-CEPRA 2015. El proyecto es*

*ejecutado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Universidad Técnica de Ambato, Escuela Politécnica Nacional y la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.*

## **1.6. Hipótesis**

Un robot móvil tipo unicycle puede seguir objetos a través de retroalimentación visual.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

La visión como sensor parte de la experiencia dada en la naturaleza, ya que la mayoría de información del entorno es adquirida gracias a los ojos que poseen los organismos vivientes. En el plano robótico, la visión ha cumplido unos papeles importantes en estos últimos tiempos, de modo que se han creado numerosos sistemas de control y reconocimiento a través de la realimentación visual. Puesto que un robot no puede operar sin sensores que lo ayuden a desenvolverse en un ambiente estructurado o no estructurado, la visión monocular plantea una solución altamente escalable y permite tomar decisiones de una manera más eficaz como lo hiciera un vehículo con sensores de presencia ON/OFF o finales de carrera. (Correal, Pajares, & Ruz, 2013), (Miranda, 2014) y (Schmid, Tomi, Rues, Hirschmulle, & Suppa, 2013) analizan diferentes métodos de adquisición de imagen y procesamiento para control en robótica, tales como odometría, SLAM, seguimiento de objetivos, reconstrucción de ambientes 3D y otros. De la misma forma, un arreglo de cámaras permite conseguir información adicional y soluciona las desventajas que una sola cámara presenta. (Moreno Dueñas, 2015), (Suárez & Loaiza, 2012) y (Barranco, 2010) presentan sus trabajos de visión estéreo y (Tippetts, Lee, Lillywhite, & Archibald, 2013) analiza y presenta una comparativa de los distintos tipos de tecnología para adquirir y procesar imagen estéreo. Dentro de los proyectos que usan realimentación por intermedio de la visión para cerrar la realimentación de control, (Andaluz, Carelli, Salinas, Toibero, & Roberti, 2011), (Bazeille, Barasuol, Focchi, & al., 2014) y (Liangliang & Noboru, 2012) plantean una solución que involucra imagen con seguimiento de objetivos para robots móviles.

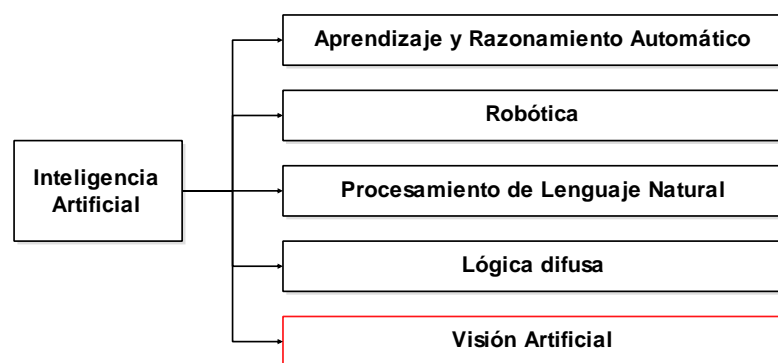
#### 2.2. Fundamento teórico

##### 2.2.1. *Visión artificial*

Uno de los sentidos más importantes de los seres humanos es la visión. La misma que es utilizada para conseguir la información del medio. Según Aristóteles, “Visión es saber que hay y dónde



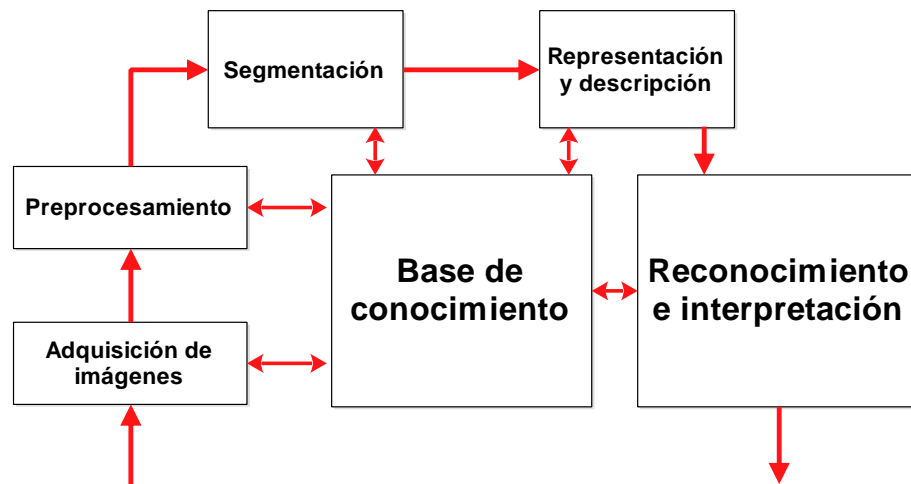
mediante la vista”. De hecho, se estima que más de 69% de las funciones del cerebro son utilizadas en el estudio de la información que proporciona la vista. La visión artificial o percepción computacional (Fukushima, January 2013) es una rama de la inteligencia artificial (Fig. 1-2.) que tiene por finalidad obtener el modelo matemático del proceso de la percepción de la vista en los seres vivos y elaborar códigos de programa que faciliten obtener una simulación del sentido de la vista en un computador. La visión artificial concede que se detecte automáticamente el ambiente estructural y las características de un probable mundo dinámico en tercera dimensión partiendo de una o muchas imágenes en dos dimensiones del mundo. Las imágenes pueden ser monocromáticas o a color, los dispositivos de captura pueden ser estacionarios o móviles y pueden ser capturadas por una o varias cámaras. La estructura y las características del mundo en tres dimensiones que se desean deducir en la visión artificial relacionan no sólo propiedades geométricas como el tamaño, la forma, la localización de objetivo, así también propiedades del material como colores, texturas, composición, entre otros y la intensidad luminosa o la oscuridad de las superficies (Zhanga, y otros, 2015).



**Fig. 1-2** Ramas de la inteligencia artificial  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

La información visual adquirida por el sistema de percepción computacional (Fig. 2-2) es una proyección bidimensional de objetos tridimensionales y, por tanto, la imagen que capta el ojo humano o una cámara digital tiene infinitas interpretaciones posibles. La percepción es un proceso que se distribuye a lo largo del espacio y del tiempo.

Básicamente, la visión artificial abarca las siguientes áreas de estudio: i) el reconocimiento de los patrones de la imagen, es el encargado de la identificación de el o los objetos que se encuentran presentes en la imagen utilizando cálculos estadísticos, ii) la reconstrucción en tres dimensiones, capta la imagen del medio y vuelve a construir los puntos existentes en las imágenes bidimensionales a tridimensionales, además de calcular la dimensión de los objetos que se encuentran en la imagen, iii) la detección de los objetos en movimiento, o tracking, permite que se detecte objetivos de forma rápida en los videos y iv) el reconocimiento de los objetos en tres dimensiones, el objetivo es unir las 3 disciplinas para poder identificar el objeto de forma tridimensional.



**Fig. 2.2** Fases de la visión artificial  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 2.2.2. *Detección de objetos en movimiento en imágenes*

Se han desarrollado métodos para detectar el movimiento cuya finalidad es encontrar a los objetos que han cambiado de reposo a un estado de movimiento (Sivaraman & Trivedi, 2013). Existen tres grupos de problemas que se relacionan con la detección de movimiento: *i*) Una cámara fija se ubica en la escena y se intenta ubicar los objetos que cambiaron de su estado de reposo; *ii*) Detectar y localizar los objetos en movimiento donde se puede tener una cámara estática y los objetos se mueven, o los objetos permanecen estáticos y la cámara se mueve o ambas cosas. El problema en este método radica en detectar al objeto, detectar la trayectoria de su movimiento, la predicción de su futura trayectoria y *iii*) el último grupo se relaciona a la obtención de propiedades 3D a partir de una secuencia de imágenes que se adquiere en distintos instantes de tiempo. Los métodos más comunes en la detección de movimiento en imágenes son: basados en características y basados en regiones (Al-Rahayfeh & Faezipour, 2013).

#### 2.2.2.1. *Métodos basados en características del objeto*

Las características que se obtienen de un objeto se pueden aplicar para encontrar la correspondencia en un par de imágenes, para saber si el objeto ha cambiado de su estado de reposo a movimiento. Se pueden considerar como características las líneas, esquinas, conjunto de puntos, etc. Estos métodos no son sensibles a los cambios de iluminación y el ruido como el flujo óptico o la resta de imágenes. Estos métodos son robustos ante la oclusión ya que se puede encontrar la correspondencia de un conjunto de puntos solo considerando un porcentaje del conjunto total. La desventaja que tienen radica en el problema de correspondencia, cuando se incrementa el número de características.

### 2.2.2.2. Métodos basados en regiones o en contornos

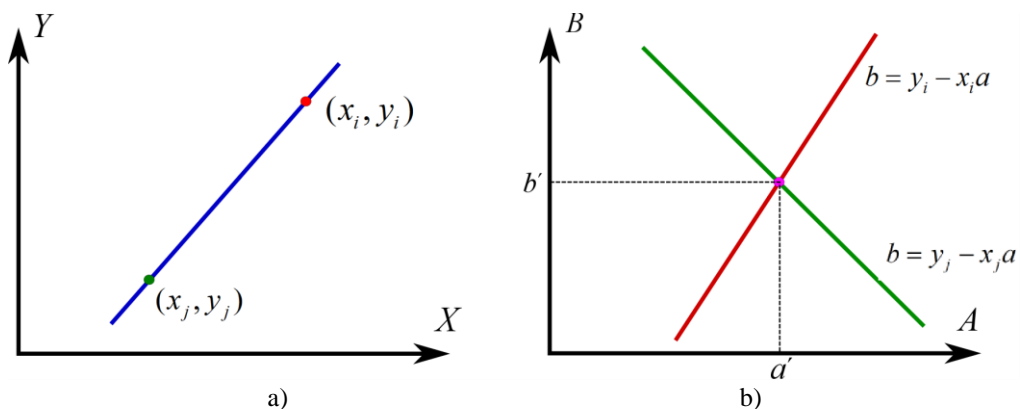
En los métodos de seguimiento basados en regiones se considera al objeto o al conjunto de objetos como regiones, donde en aplicaciones de seguimiento se puede utilizar el centro de masa de cada región como una característica a seguir. Es fácil resolver el problema de apertura en este caso, ya que se realiza mediante una ventana de búsqueda de solo el centro de masa de cada región detectada. Los métodos basados en contornos (Fig. 3-2) buscan una correspondencia de un conjunto de puntos que representan al contorno o funciones paramétricas, por ejemplo dos términos de energía que describen la deformación del contorno en el tiempo, y la que describe la correspondencia de los puntos del contorno.



**Fig. 3-2** Detección de objetos basado en contornos  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 2.2.2.3. Detección de formas geométricas a través de la transformada de Hough

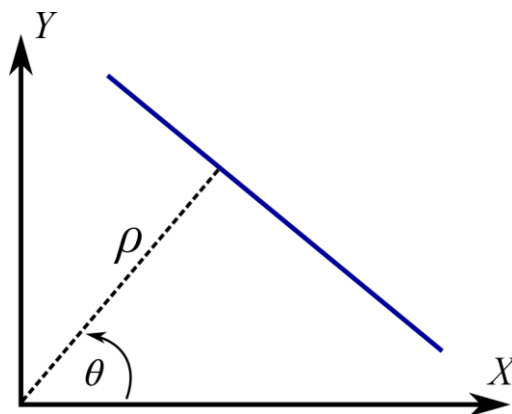
Considerando las relaciones globales entre píxeles de borde, la transformada de Hough permite encontrar ciertos patrones en la imagen como líneas y círculos. Consideremos un punto  $(x_i, y_i)$  y la ecuación de la recta  $y_i = ax_i + b$  de la forma pendiente y ordenada al origen (Fig. 4-2 (a)).



**Fig. 4-2** Representación de: a) la recta en el plano xy, b) dos puntos de la recta en el espacio de parámetros  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Por el punto  $(x_i, y_i)$  pasan infinitas rectas, todas satisfaciendo la ecuación anterior para diferentes valores de  $a$  y  $b$ . Sin embargo, representando esta ecuación en la forma  $b = y_i - x_i a$  y considerando el plano  $AB$  (o espacio de parámetros), se da lugar a una única recta para el par  $(x_i, y_i)$  constante. Considerando también que ahora un segundo punto  $(x_j, y_j)$  va a tener su recta asociada en el espacio de parámetros, estas dos rectas se cortarán en el espacio de parámetros en un punto  $(a', b')$ , donde  $a'$  es la pendiente y  $b'$  es la ordenada al origen de la recta que contiene a los puntos  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$  en el plano  $XY$ , como se puede ver en la Fig. 4-2 (b). De hecho, todos los puntos de esta recta en el plano  $XY$  darán lugar a rectas diferentes en el espacio de parámetros que se cortan en un único punto  $(a', b')$ .

Un problema que surge al usar la ecuación de la recta para representar una línea es que tanto la pendiente como la ordenada al origen pueden llegar a valer infinito, según la línea alcance la verticalidad. Para resolver este problema, se emplea la representación normal de la recta  $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$ . En este caso, a cada punto del plano  $XY$  corresponde ahora una sinusoides en el plano  $\rho\theta$  en lugar de una recta. Al igual que antes,  $M$  puntos colineales a la recta  $x \cos \theta_j + y \sin \theta_j = \rho_j$  darán lugar a  $M$  sinusoides que se cortan en el punto  $(\rho_i, \theta_j)$  en el espacio de parámetros. Incrementando  $\theta$  y calculando  $\rho$ , obtendremos  $M$  entradas en el acumulador  $\mathbf{A}(i, j)$  correspondiente al par  $(\rho_i, \theta_j)$ . La Fig. 5-2 muestra el significado de los nuevos parámetros,  $(\rho, \theta)$ .



**Fig. 5-2** Representación normal de la recta  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

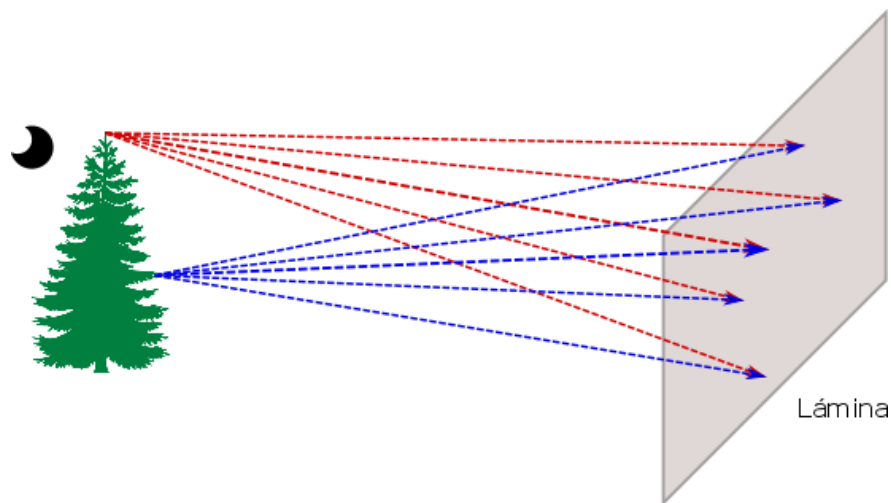
Adicional al caso de las rectas, Hough también es aplicable a cualquier función de la forma  $f(v, c) = 0$ , donde  $V$  es un vector de coordenadas y  $C$  es un vector de coeficientes. Por ejemplo, los puntos que forman parte de una circunferencia  $(x - c_1)^2 + (y + c_2)^2 = c_3^2$  se pueden detectar empleando también la transformada de Hough. En este caso tenemos 3 parámetros

$(c_1, c_2, c_3)$ , lo que dará lugar a un espacio de parámetros de tres dimensiones, con celdas en forma de cubo y acumuladores de la forma  $\mathbf{A}(i, j, k)$ . La complejidad de la transformada es claramente dependiente del tamaño del espacio de parámetros.

Basada en las características de forma, la transformada de Hough permite encontrar figuras geométricas a partir de cálculos en un plano de imagen, formas que pueden ser desde líneas rectas hasta circunferencias. Especialmente en circunferencias, la transformada de Hough permite determinar su radio y las coordenadas de su centro, facilitando el reconocimiento de un objeto circular en el caso de ser una imagen plana o una esfera en un espacio tridimensional.

### 2.2.3. *Modelo basado en Pinhole*

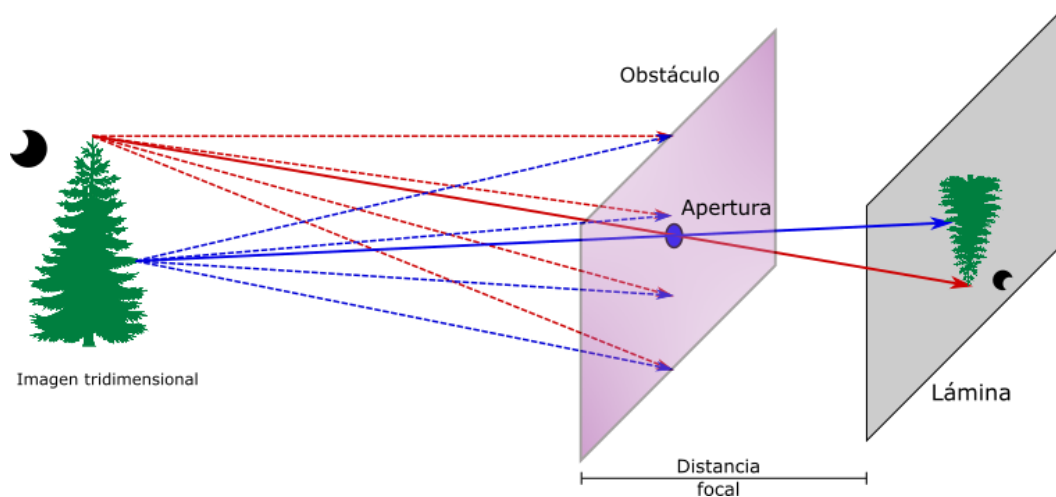
El análisis de captura de imagen parte del problema consecuente de intentar retratar un punto ubicado en el espacio en un plano de dos dimensiones equivalente. Si un sensor capaz de capturar una imagen es colocado directamente en frente del objeto que se planea capturar, el resultado es una saturación de puntos desordenados. La Fig. 6-2 ilustra el problema sugerido (Sturm, 2016).



**Fig. 6-2** Lámina colocada directamente al frente de la imagen  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

La primera aproximación para obtener una imagen acorde a la observada en el espacio tridimensional es a través del uso de una cámara estenopeica (Pinhole). Basándose en el bloqueo de la mayoría de rayos de luz proyectados de la imagen fuente, un resultado acorde a la imagen

real capturada se presenta en la Fig. 7-2.



**Fig. 7-2** Cámara Pinhole

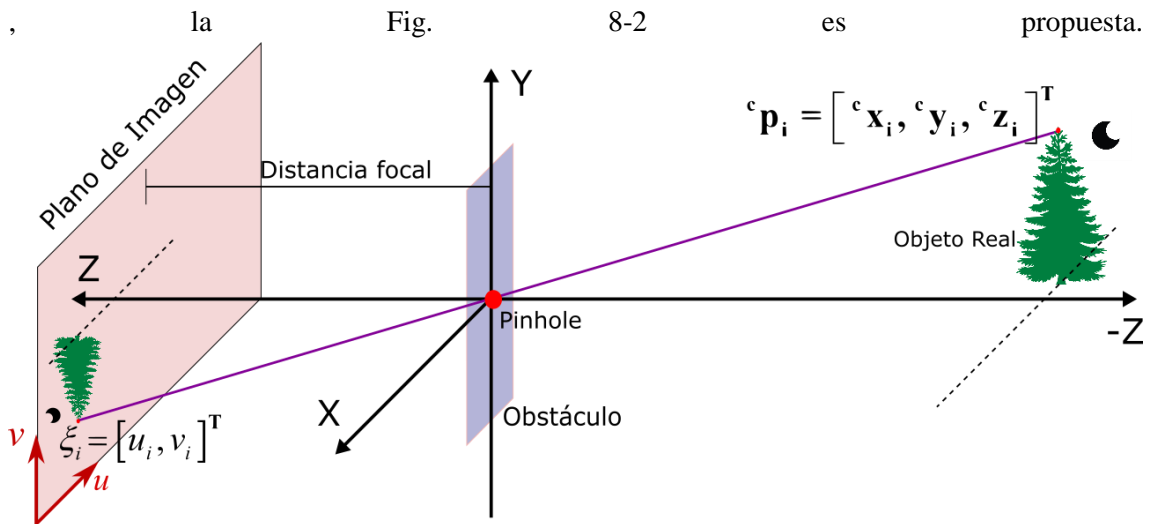
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Los efectos producidos por la cámara Pinhole son la reducción de tamaño de los objetos. Este proceso hace que luzcan más pequeños de lo que realmente son, donde las distancias y ángulos son suprimidos.

Dadas las condiciones requeridas para adquirir una imagen clara, la cámara Pinhole debe tener una apertura óptima. Dentro del análisis de la apertura de la cámara, si ésta es superior a la óptima, los rayos de luz no son adecuadamente bloqueados y como consecuencia la imagen será borrosa. Por el contrario, si la apertura es inferior, la imagen será borrosa pero a consecuencia de las propiedades de longitud de onda de la luz.

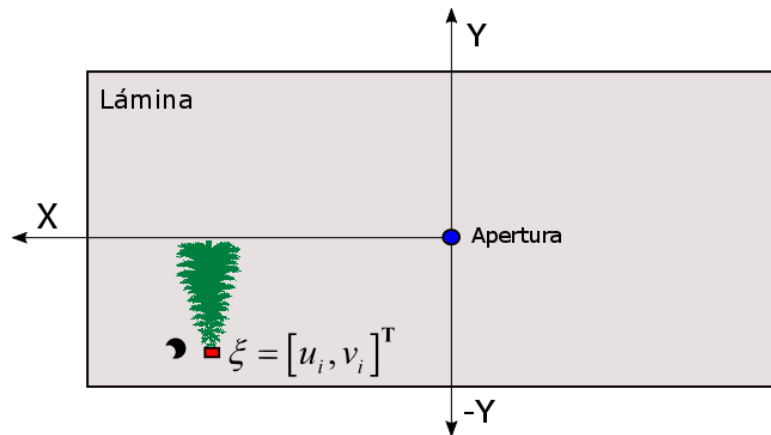
Idealmente, la profundidad de campo de una cámara Pinhole es infinito. Esto significa que la imagen borrosa no depende de la distancia del objeto capturado. Sin embargo, existen otros factores que pueden provocar opacidad en la imagen final tales como tamaño de la apertura, distancia focal o ancho de longitud de onda.

Con el fin de obtener las ecuaciones matemáticas que describen un punto  ${}^c\mathbf{p}_i = [{}^c\mathbf{x}_i, {}^c\mathbf{y}_i, {}^c\mathbf{z}_i]^T$  sobre un espacio tridimensional en uno en dos dimensiones capturado por la cámara  $\xi = [u_i, v_i]^T$



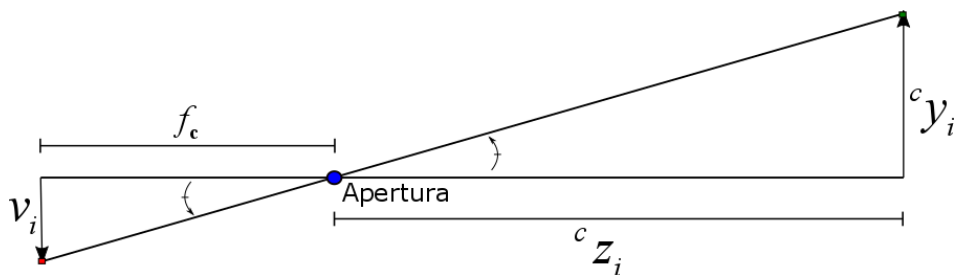
**Fig. 8-2** Captura de un punto del espacio tridimensional en la lámina de la cámara  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Basado en este análisis y conociendo la distancia focal  $f_c$ , cualquier punto  $\xi_i$  sobre el plano capturado puede ser representado como se presenta en la Fig. 9-2.



**Fig. 9-2** Punto capturado por la lámina y proyectado sobre el plano X-Y  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Para la obtención del modelo, el análisis se realiza por cada eje bidimensional y se analiza de la forma mostrada en la Fig. 10-2.

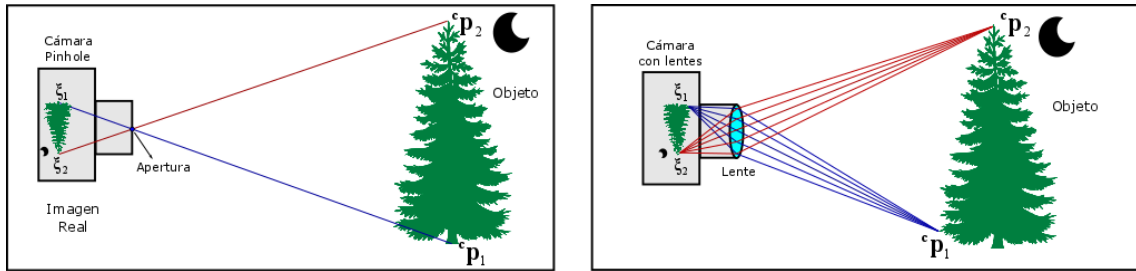


**Fig. 10-2** Análisis de fórmulas basado en Pinhole  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

El valor en el eje  $v$  de cada uno de los píxeles se puede hallar usando semejanza geométrica. De esta manera, la relación creada por compartir el mismo ángulo permite obtener (1.1).

$$v_i = -\frac{f_c({}^c y_i)}{{}^c z_i}, u_i = -\frac{f_c({}^c x_i)}{{}^c z_i} \quad (1.1)$$

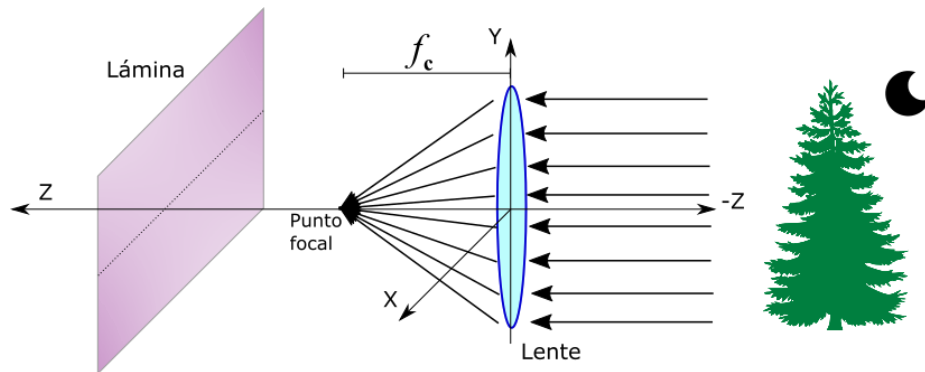
En orden de incrementar la calidad de luz capturada por la lámina, se propone la colocación de lentes convexas en frente del sensor fotográfico. Asumiendo un cálculo adecuado del tipo de lentes a usar y aproximación paraxial, los lentes fuerzan a que todos los rayos paralelos converjan en un punto como si se tratara de una cámara Pinhole. La Fig. 11-2 muestra la diferencia física entre el uso de una cámara Pinhole y otra basada en lentes.



**Fig. 11-2** Imagen real a través de una cámara Pinhole, Imagen real a través de una cámara de lentes

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Asumiendo que los lentes son puramente refractivos (sin reflexión ni difracción), para la facilidad de cálculo se considera aproximación paraxial. Dentro de la aproximación paraxial, el espejo esférico se comporta como un sistema óptico perfecto suponiendo teóricamente que todos los rayos ópticos formen ángulos muy pequeños respecto al eje óptico. La Fig. 12-2 muestra el uso de lentes en lugar de la apertura de Pinhole y aproximación paraxial.



**Fig. 12-2** Uso de lentes para mejorar la definición de la imagen

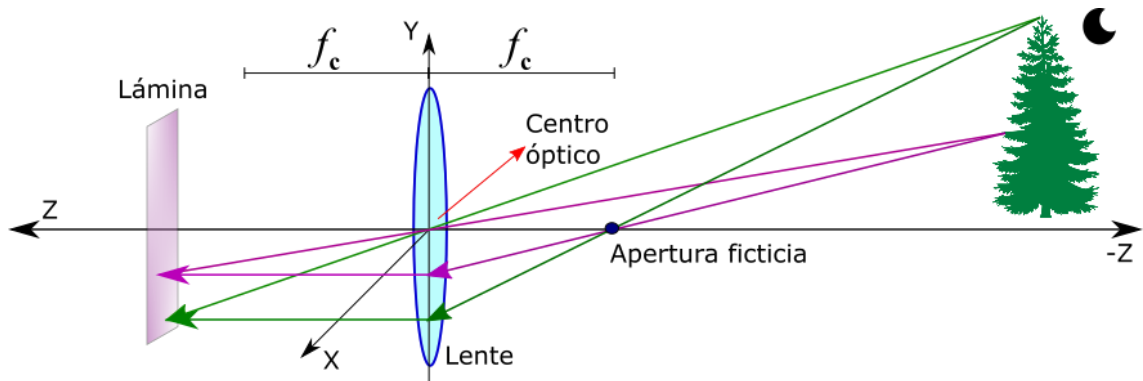
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Si el objeto está suficiente alejado de los lentes (más que  $f_c$ ), se puede calcular la proyección del objeto sobre la lámina usando las propiedades mostradas en la Fig. 13-2.

De esta manera, los rayos incidentes que chocan al lente y están cercanos al centro óptico lo atraviesan directamente y chocan en un punto  $\xi_i$ , mientras que los rayos de luz más lejanos al



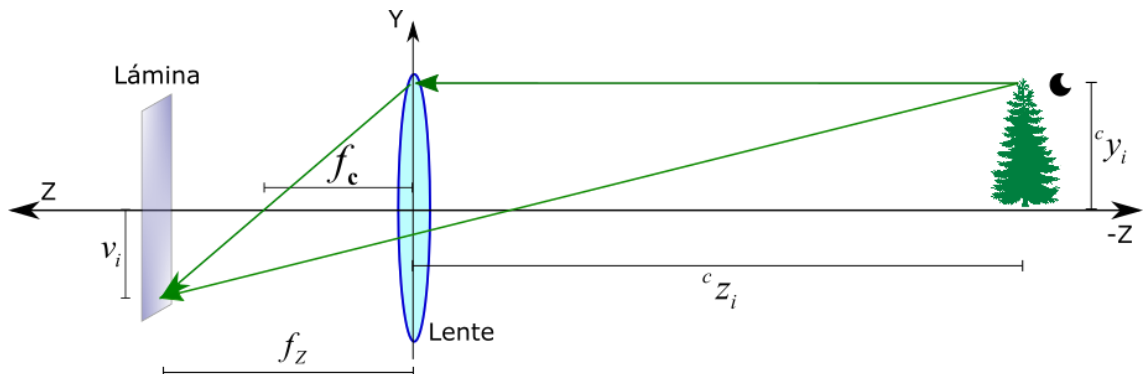
centro óptico y que cruzan por la apertura ficticia generada por  $f_c$  (punto focal) son desviados y chocan en el mismo punto (Alvarez, Gomez, & Sendra, 2010).



**Fig. 13-2** Desviación de rayos de luz lejanos al centro óptico

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

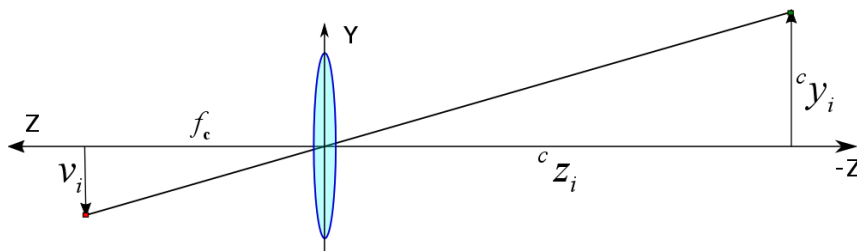
Para facilitar el entendimiento del cálculo se puede simplificar el modelo tomando en cuenta el tamaño de la proyección por una dimensión, y después de esto extrapolar los resultados a dos dimensiones. Además, trabajar con objetos más pequeños simplifica la aproximación matemática.



**Fig. 14-2** Incidencia de un punto del objeto real sobre la lámina a través de una lente

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

De manera similar al análisis con la cámara Pinhole, usando lentes se tienen los casos presentados por las Fig. 15-2 y 16-2. La Fig. 15-2 muestra el análisis de los rayos cercanos al centro óptico, mientras que la Fig. 16-2 presenta el comportamiento de los haces de luz lejanos al centro óptico. Usando semejanza geométrica nuevamente, (1.2) y (1.3) son obtenidas.

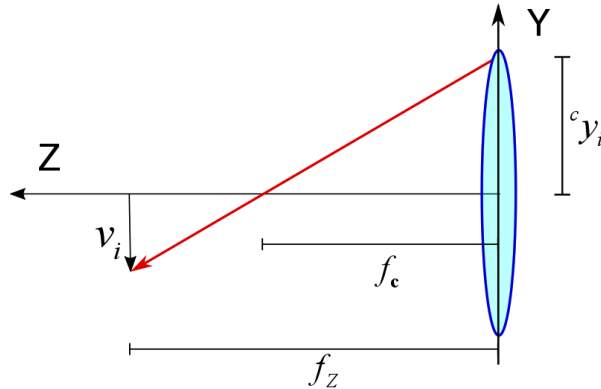


**Fig. 15-2** Relación de triángulos similares para rayos de luz cercanos del centro óptico

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

$$\frac{v_i}{f_c} = \frac{{}^c y_i}{{}^c z_i} \quad (1.2)$$

$$v_i = \frac{{}^c y_i (f_c)}{{}^c z_i} \quad (1.3)$$



**Fig. 16-2** Relación de triángulos similares para rayos de luz lejanos del centro óptico

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

$$\frac{v_i}{f_z - f_c} = \frac{{}^c y_i}{f_c} \Rightarrow \frac{v_i}{{}^c z_i} = \frac{f_z - f_c}{f_c} = \frac{f_z}{f_c} - 1 \quad (1.4)$$

Aplicando triángulos similares nuevamente, igualando con (1.4) y dividiendo por la distancia focal se obtiene (1.5) del foco de la lente:

$$\frac{f_z}{{}^c z_i} = \frac{f_z}{f_c} - 1 \Rightarrow \frac{1}{{}^c z_i} = \frac{1}{f_c} - \frac{1}{f_z} \quad (1.5)$$

De este modo, todos los puntos del objeto que satisfagan la ecuación  $\frac{1}{f_c} = \frac{1}{{}^c z_i} + \frac{1}{f_z}$  estarán enfocados.

Para resumir el modelo de la cámara, los resultados obtenidos de convertir puntos 3D en coordenadas bidimensionales son los mostrados en (1.6) y (1.7).

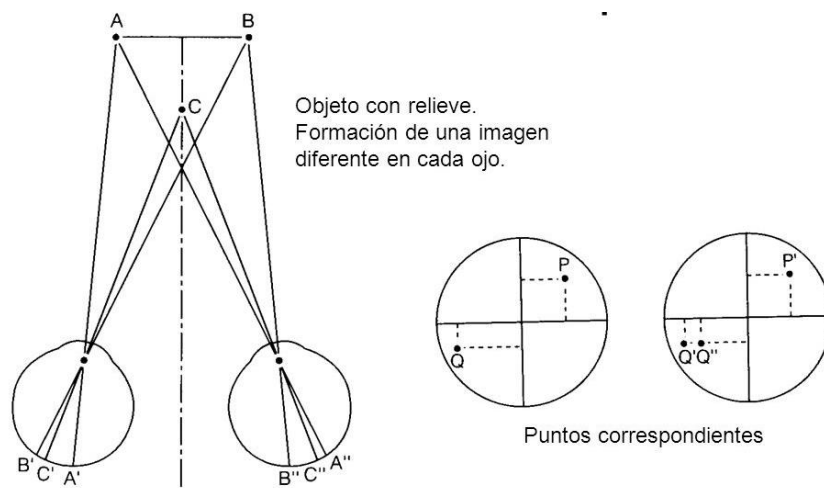
$$u_i = -\frac{f_c ({}^c x_i)}{{}^c z_i} \quad (1.6)$$

$$v_i = -\frac{f_c ({}^c y_i)}{{}^c z_i} \quad (1.7)$$

#### 2.2.4. Visión estéreo

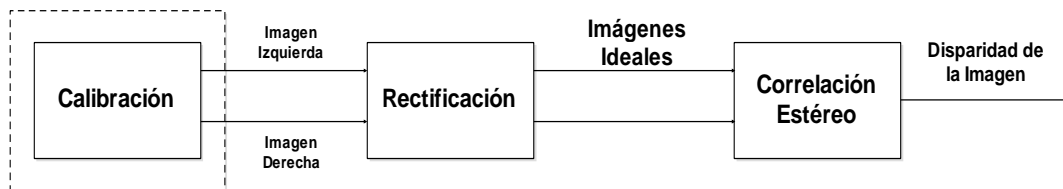
El mecanismo de visión de los seres vivos comúnmente se compone de dos ojos, permitiendo apreciar a través de dicha combinación un arreglo de imágenes tridimensionales. Con la apreciación de tridimensionalidad, distancias y profundidades son apreciadas con mayor exactitud que con un solo receptor de imagen. Sin embargo, la tridimensionalidad considera ciertos parámetros para definir sus características, tales como la separación y la configuración entre ambos receptores. El par de imágenes receptadas presentan una disparidad dada por la separación entre ojos o cámaras, obteniéndose pequeñas diferencias entre ellas que son usadas para definir las características de volumen. En el caso de los seres vivos, el cerebro procesa dichas diferencias, de manera que el organismo percibe la sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos que lo rodean, proceso conocido además como estereopsis. En los seres humanos, la distancia interpupilar más habitual es de 65 mm, pero puede variar desde los 45 a los 75 mm.

El arreglo de imagen dado por los ojos presenta diversas características dependiendo de su modo de trabajo. Cuando se observa objetos muy lejanos, los ejes ópticos de los ojos se tornan paralelos. A diferencia, cuando se observa un objeto cercano, los dos ojos del ser humano giran para que los ejes ópticos se alineen sobre él, es decir, convergen y a su vez, se produce el acomodo o enfoque para ver de manera más nítida el objeto (Starr & Lattimer, 2013). La Fig. 17-2 ilustra la interpretación de la visión estéreo.



**Fig. 17-2** Interpretación de la visión estéreo  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Para un buen entendimiento del proceso estéreo, es necesario entender adecuadamente los pasos involucrados. El proceso estéreo completo es descrito en dos etapas, como a continuación se muestra en la Fig 18-2.



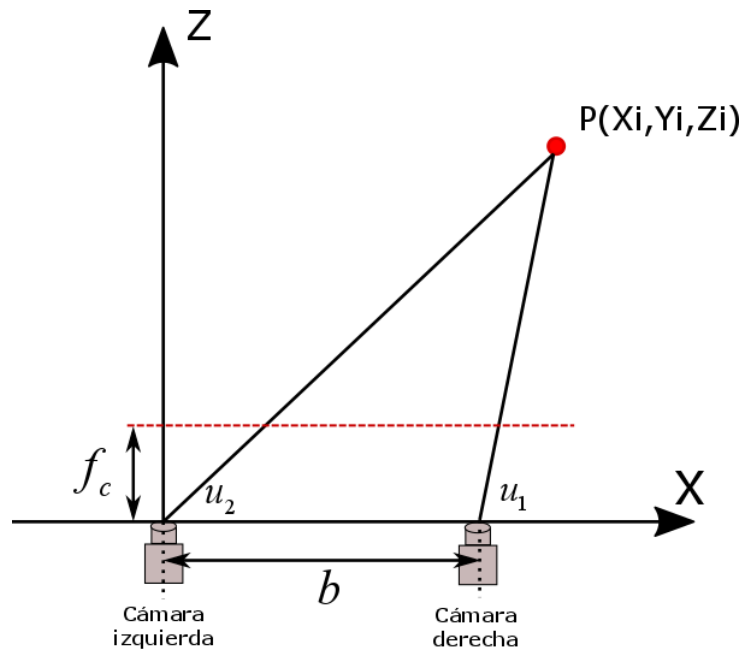
**Fig. 18-2** Etapas del modelo ideal estéreo

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

La etapa de *Calibración* produce la información necesaria para el paso de rectificación y para los parámetros del par estéreo resultante. Cuando se da la calibración en un sistema de visión estéreo, las imágenes de entrada son usualmente convertidas a imágenes ideales antes de ser desplegadas. En general, el usuario debe interactuar solo con las imágenes ideales dado que con éstas el problema de disparidad resulta más sencillo. En la etapa de *Rectificación*, las imágenes de entrada son convertidas en un par de imágenes estéreo ideales, con una muy particular geometría. Esta geometría hace más fácil que los algoritmos de correlación estéreo encuentren la correlación correcta (disparidad) para cada pixel. También permite al sistema de visión estéreo (SVS) reprojectar un pixel a sus coordenadas tridimensionales, dada la disparidad.

La triangulación en el análisis estéreo es la tarea de calcular la posición en tercera dimensión de puntos en las imágenes, dado el mapa de disparidades y la geometría de la configuración estéreo. Consideremos el ajuste óptico en la Fig. 19-2, que también se denomina modelo estándar y se tengan las siguientes consideraciones:

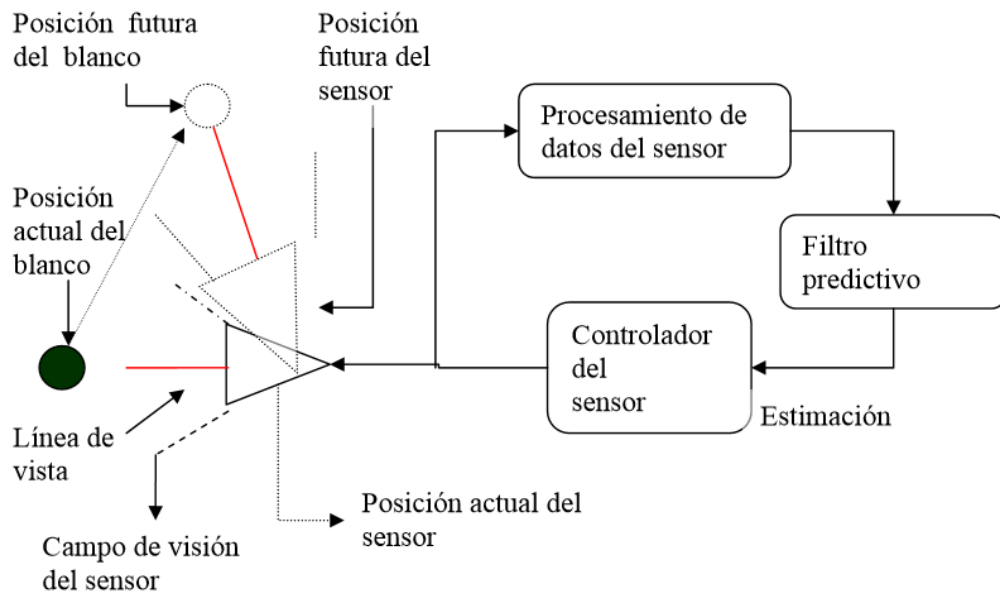
- Las cámaras izquierda y derecha son dos cámaras de Pinhole con ejes ópticos paralelos, donde  $f_c$  representa la distancia focal de ambas cámaras.
- La línea de base (que es la línea que conecta los dos centros de lente) es perpendicular a los ejes ópticos. Sea  $b$  la distancia entre los dos centros de la lente.
- El plano donde se encuentran los ejes ópticos es  $X-Z$ , donde  $X-Y$  es el plano paralelo al plano de imagen de ambas cámaras.
- $X$  es el eje igual a la línea de base y el origen  $O$  del sistema de referencia mundial  $(X, Y, Z)$  es el centro de la lente de la cámara izquierda.



**Fig. 19-2** Ajuste óptico  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 2.2.5. Seguimiento de objetos por visión

El objetivo de un sistema de seguimientos de objetos es recolectar distinta información a lo largo del tiempo (Lin, Dong, Chen, & Lum, 2012). Dicha información puede ser la posición del objeto, su orientación, o la posición en el campo de vista de las cámaras. El objetivo a seguir puede ser representado por cuantificaciones que simbolizan la conducta que éste debe tener en el sistema. En la Fig. 20-2 se muestra un sistema de seguimiento para un solo blanco, en el cual la cámara intenta mantener la posición del objetivo en su línea de vista. La información que resulta se procesa para saber la posición relativa del objetivo con respecto a la cámara. Una vez procesada la información, el resultado es usado para realizar la estimación del estado del objetivo y así ubicar a la cámara en una nueva posición. Esto se efectúa para mantener al objetivo de interés lo más cerca al centro de su línea de vista. El controlador es el que hace la maniobra de posicionamiento en tiempo real para después actualizar de su orientación. Así como existen sistemas de seguimiento de un solo objeto, existen además sistemas de seguimiento en los que se tiene a más de un objetivo. Estos sistemas se hacen llamar de seguimiento de múltiples objetivos. Cuando en una aplicación se requiere seguir a más de un objetivo, un módulo de asociación de datos es necesario. La función que asocia los datos es usada para administrar las medidas que se obtienen de un sensor de cada objetivo. La diferencia entre un sistema de seguimiento de un objetivo y de múltiples objetivos es que el sistema de seguimiento de un objetivo no necesita de una función que asocie los datos. En (Blackman & Popoli, 1999) se representa un escrutinio en sistemas de seguimiento de objetivos.



**Fig. 20-2** Módulos en un sistema de seguimiento para un solo blanco  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 2.2.6. Morfología de los robots móviles

La implementación de robots móviles pretende solucionar la problemática de tener una estructura mecánica anclada a un extremo con un ambiente estructurado, extendiendo de esta manera el campo aplicativo de la Robótica convencional. Adicional a liberar el robot móvil de una estructura fija, la intervención del operador humano busca ser eliminada o limitada gracias a la inclusión de sensores y dispositivos electromecánicos. Un ejemplo sobresaliente es el desarrollo de los denominados “micro-mouse”, cuya función era descubrir y memorizar rutas en laberintos a principios de los años treinta. Otro ejemplo que cumplía con tareas autónomas es la tortuga de Walter, robot capaz de modificar su curso ante la presencia de obstáculos, desplazarse en caminos a desnivel y ejecutar tareas de auto recarga. Dichos trabajos de investigación están alejados de las aplicaciones que los vehículos autónomos desempeñaron en los inicios de los años sesenta, ya que a nivel industrial, los vehículos autónomos requerían de complejos sistemas de cableado y señalización. Adicionalmente, las aplicaciones que se llevan a cabo hasta el presente con vehículos autónomos requieren muchas veces de espacios completa o parcialmente estructurados para facilitar la automatización (Liu, Stoll, Junginger, & Thurow, 2014).

Una de las condiciones para la ejecución de tareas en ambientes interiores es la estructuración del medio de trabajo. Bajo este paradigma, los resultados de ejecución de tareas han sido satisfactorios ya que los ambientes bajo techo son apropiados para la correcta recepción de información del medio. Las capacidades de los sensores frecuentemente están ligadas a condiciones de trabajo fijas, por ende, los espacios cerrados ayudan al correcto desempeño de los elementos que componen un robot móvil autónomo. Sin embargo, los resultados esperados se han

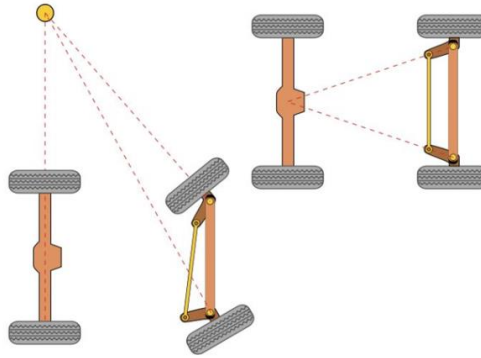
logrado solo con una contraparte de hardware de alto costo (Okumura, Takei, & Tsubouchi, 2010).

A pesar de la existencia una amplia lista de robots móviles, este trabajo investigativo se centra en aquellos que se desplazan mediante una composición de ruedas. Los robots móviles con ruedas suelen ser la solución más óptima para tareas en terrenos en nivel, libres de obstáculos o que permitan conseguir velocidades altas en comparación a otros mecanismos compuestos de extremidades. Sin embargo, las limitaciones inician cuando los terrenos son blandos o que no presenten suficiente rozamiento con las ruedas (Rodrigues, Marques, Pinto, & Pombeiro, 2015). Adicionalmente, una configuración con ruedas limita la adaptación a diferentes terrenos en cuanto a estabilidad, limitando aún más los caminos aceptables.

Respecto a la eficiencia energética, dimensiones y maniobrabilidad, los robots móviles emplean diferentes tipos de locomoción mediante ruedas, brindándoles diferentes características y propiedades. En este contexto, la mejor maniobrabilidad se consigue mediante el uso de ruedas omnidireccionales (Inoue, Hirama, & Wada, 2013). Un vehículo compuesto por ruedas omnidireccionales es capaz de trasladarse en cada eje del sistema de coordenadas independientemente, además de rotar sobre el eje perpendicular. La sección siguiente describe las características más significativas de los sistemas de locomoción más comunes en los robots móviles.

#### **2.2.6.1. Configuración tipo Ackerman**

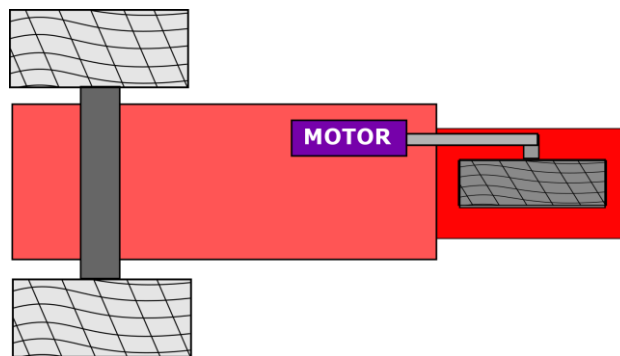
Ackerman o car-like es la configuración utilizada en medios de transporte con cuatro ruedas comunes (Fig. 21-2). De hecho, los medios de transporte robóticos para exteriores resultan de la modificación de medios de transporte comunes tales como automóviles o también medios de transporte pesado. En esta configuración, la rueda interna de adelante gira un ángulo mayor a la exterior con el objetivo de que se elimine el desliz que se pueda presentar. Las continuaciones de los ejes de las dos ruedas delanteras se cruzan en un punto sobre la prolongación del eje de las ruedas de atrás. El sector de los puntos dibujados sobre el suelo por los centros de los neumáticos son círculos concéntricos con centro el eje de rotación. Al no tenerse en cuenta las fuerzas centrífugas, los vectores de velocidad en ese instante son tangentes a las curvas.



**Fig. 21-2** Robot móvil tipo car-like  
Realizado por: Marlon Santamaría Villacis

### 2.2.6.2. Configuración tipo triciclo clásico

En la configuración tipo triciclo, la rueda delantera es usada tanto para la tracción como para el direccionamiento. El eje trasero posee dos ruedas laterales y es pasivo haciendo que sus ruedas se muevan de forma libre. La forma de maniobrar es mucho mayor que en la disposición descrita con anterioridad, la posible desventaja es la inestabilidad en terrenos irregulares. Cuando el vehículo se desplaza por una pendiente, el centro de gravedad suele desplazarse, causando la pérdida de tracción. La Fig. 22-2 ilustra la distribución de ruedas de una configuración tipo triciclo.



**Fig. 22-2** Robot móvil tipo triciclo  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

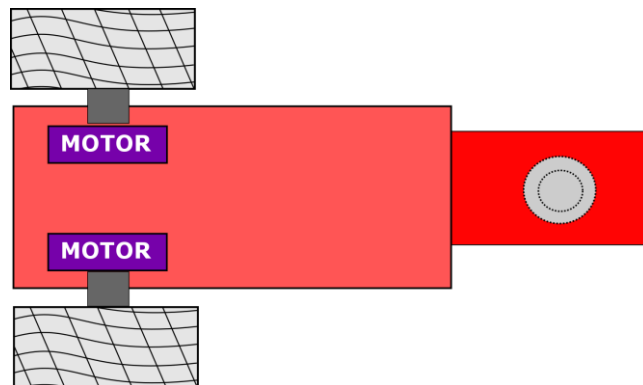
### 2.2.6.3. Configuración de direccionamiento diferencial o tipo unicycle

En la configuración tipo unicycle, el direccionamiento del robot se da por la resta de velocidades entre sus ruedas laterales, donde la tracción se consigue también con estas mismas ruedas. Como requerimiento de estabilidad, existen una o más ruedas para soporte (normalmente ruedas de desplazamiento libre). Esta configuración es la más frecuente en robots para interiores por la facilidad de control, donde las principales características de un robot diferencial son:



- ✓ Debe tener dos ruedas laterales, las mismas que proporcionan el sistema de direccionamiento y la tracción del robot móvil.
- ✓ Debe tener una o más ruedas de soporte.
- ✓ Debe tener 3 grados de libertad.
- ✓ Debe ser capaz de modificar su dirección instantáneamente, el cual puede ser tratado como un punto sin masa que se pueda mover en cualquier dirección.

La configuración de la Fig. 23-2 permite al robot móvil girar en su propio sitio con respecto al eje del lado vertical con el objetivo de maniobrar en áreas con mucha congestión. La velocidad de las ruedas es monitoreada por encoders ópticos sujetos al eje de la estructura.



**Fig. 23-2** Robot móvil tipo Uniciclo  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 2.2.7. Control de robots

En el área de control de robots, el principal objetivo es que el vehículo ejecute de manera automática los movimientos preparados o que reaccione de forma adecuada frente a la percepción del entorno. Para alcanzar de manera efectiva el control de vehículos autónomos, la obtención de leyes de control que permitan estabilizar el vehículo sobre un punto de trabajo deben establecerse, anulando el efecto de las perturbaciones, o bien permitir que el vehículo siga automáticamente una ruta de referencia. (Brandão, Andaluz, Sarcinelli-Filho, & Carelli, 2011). Dependiendo de las características del robot móvil, los métodos de control varían en relación a los objetivos de control, los cuales pueden ser de seguimiento de objetos, seguimiento de trayectorias o seguimiento de caminos.

#### 2.2.7.1. Seguimiento de objetos mediante telemetría

El seguir objetos se difiere con seguir posturas, ya que en el segundo se debe seguir el trayecto en el tiempo de una postura de referencia  $\rho_{ref} = (x, y, \varnothing)_{ref}$ , constituida por la posición y la

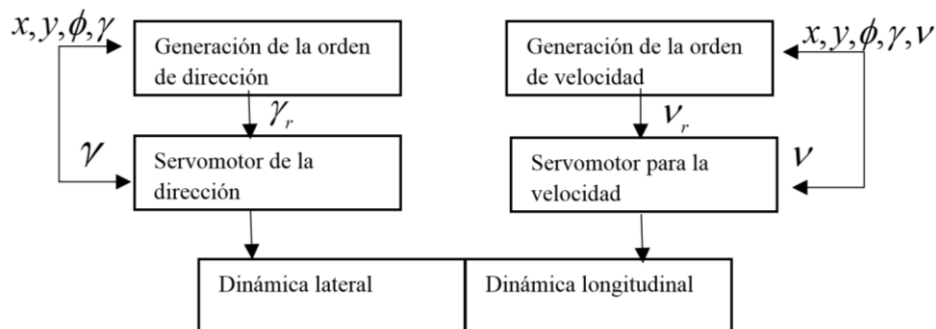
orientación, o bien únicamente el seguimiento en el tiempo de una posición de referencia

$$\rho_{ref} = (x, y)_{ref}.$$

En el inconveniente de seguimiento, el principal reto a cumplir es que el error  $\rho_{ref}(t) - \rho(t)$  se acerque a cero, manteniendo acotadas las señales de control. Se debe tener en cuenta que en el inconveniente del seguimiento de  $\rho_{ref}(t)$  se relaciona el control de la dirección y la velocidad del vehículo autónomo. Este inconveniente se presenta por ejemplo cuando se desea, seguir a otro cuerpo móvil, determinando  $\rho_{ref}(t)$  por intermedio del sistema de percepción. Es posible también ponerse un sistema similar al del control de un manipulador robótico intentando seguir una trayectoria temporal.

Sin embargo cuando se quiere seguir un camino previamente definido sin tomar en cuenta la velocidad, interviene exclusivamente el control de la dirección. Las particularidades del robot móvil son importantes. De esta manera las técnicas utilizadas para ejecutar el control de robots pequeños que circulan en una sola dirección son diferentes de las que se utilizan para controlar vehículos convencionales.

En la Fig. 24-2 se denota un esquema de control de vehículos autónomos en el que se identifican 2 bucles. El de la izquierda es el del control de la dirección del vehículo. Se trata de generar las órdenes a los actuadores que hacen que el vehículo tome en cada momento la dirección adecuada. El bucle que se encuentra a la derecha representa al control de la velocidad. En esta instancia, se trata de generar las órdenes a los actuadores que realizan la propulsión del vehículo.

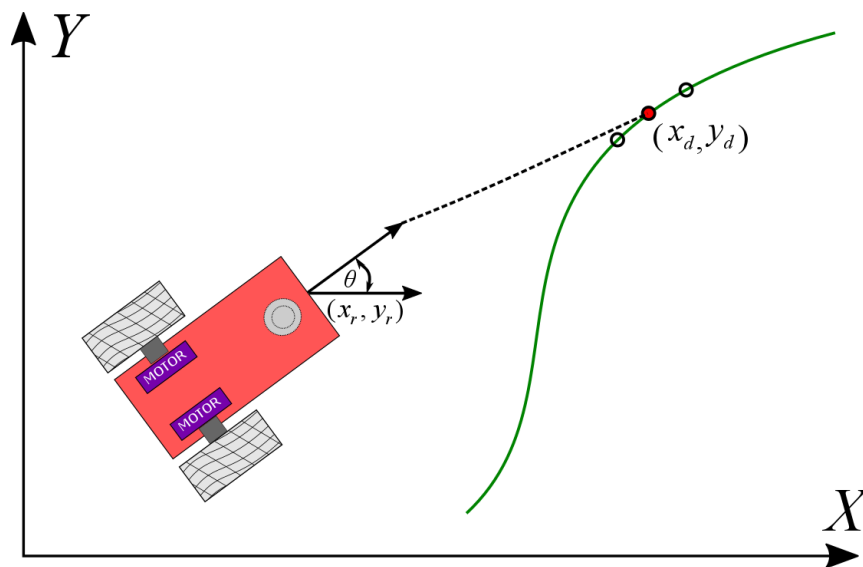


**Fig. 24-2** Control de velocidad y desplazamiento lateral  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacís

La posición del vehículo viene dada por  $x; y; \phi$  es la orientación,  $\gamma$  la curvatura y  $v$  la velocidad.

### 2.2.7.2. Seguimiento de caminos mediante telemetría

En los casos de seguimiento de rutas, se supone que la velocidad se mantiene uniforme. En la Fig. 25-2 se muestra un medio de transporte robótico, o robot móvil, y un camino que se requiere que el robot móvil tipo triciclo siga automáticamente. Conviene mencionar que la velocidad influye en la modelación del lazo de control de la dirección. Por lo tanto, si se emplea una estrategia de control basada en el modelo, cuando cambia la velocidad se modifica el modelo y por lo tanto se tiene que modificar de forma apropiada la ley de control.



**Fig. 25-2** Seguimiento de caminos  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

La ruta que se pretende seguir puede detallarse de diversas formas entre las que cabe destacar:

- Indicación con anterioridad en coordenadas absolutas a partir de planos o mapas, también con el vehículo equipado de un sistema GPS, generando un tracking que se graba en memoria para después reproducirla.
- Indicación interactiva desde un terminal, empleando técnicas de tele robótica o instrucciones determinadas.
- En un diseño de un sistema de control con inteligencia se ejecuta utilizando métodos de planificación de rutas. Esta es la estrategia que se usa en muchos sistemas de navegación automática.
- Mediante el sistema de percepción, como ocurre en el seguimiento de segmentos obtenidos mediante un sistema de visión en un vehículo, o bien en el seguimiento de trayectorias empleando además el sistema de visión.

En cualesquiera de los casos se debe suponer que la trayectoria deseada viene dada por una función explícita en coordenadas globales, o bien mediante una secuencia de posturas  $(x, y, \phi, \gamma)$  siendo  $(x, y)$  las coordenadas,  $\phi$  la orientación y  $\gamma$  la curvatura.

Las explicaciones para el diseño del algoritmo de control son normalmente:

- Exactitud en el seguimiento: reducir el error respecto al seguimiento
- Conducta dinámica: permanencia relativa y rapidez de los transitorios.
- Esfuerzo de control: reducir al mínimo las articulaciones.

Para controlar el móvil sobre el recorrido se necesita estimar su posición. Como se sabe, el método más sencillo es mediante odometría empleando las medidas de los codificadores ópticos en las bases de las ruedas y un cierto modelo. De igual manera, se puede utilizar sensores de navegación, como los giróscopos, para predecir el valor de los ángulos para los vehículos.

## CAPÍTULO III

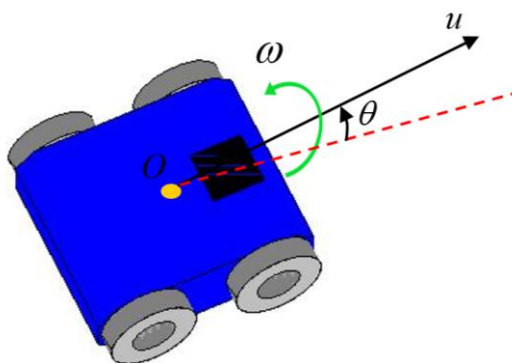
### 3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

#### 3.1. Modelación del robot móvil

El sistema está compuesto por una estructura articular de cámaras montada sobre un robot móvil tipo unicycle, por lo que se propone la modelación geométrica y cinemática de manera autónoma tanto como para la estructura, como para el robot, para a continuación encontrar un modelo consolidado que integre todo el sistema.

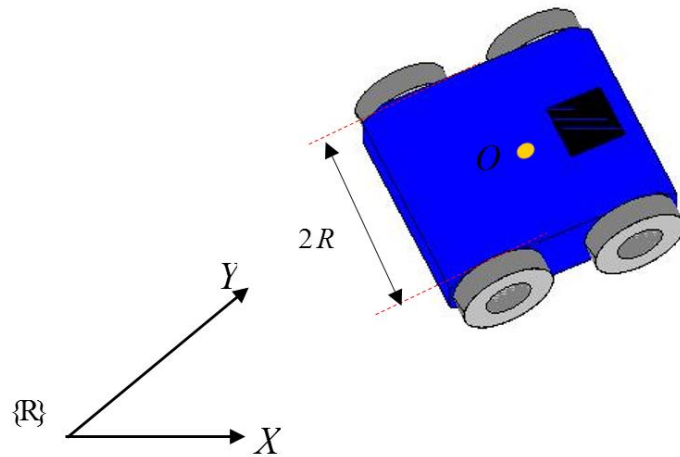
##### 3.1.1. Ecuaciones básicas del modelo cinemático

Para obtener el modelo cinemático del robot móvil tipo unicycle se deben considerar parámetros como el centro geométrico de las ruedas  $O$ , la velocidad lineal y la velocidad angular, como se muestra en las Fig. 1-3 y Fig. 2-3, donde  $R$  es la distancia paralela al eje motriz desde cero hasta el extremo de las ruedas.



**Fig. 1-3** Parámetros a considerar en el modelamiento del robot móvil tipo unicycle

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis.



**Fig. 2-3** Parámetros a considerar en el modelamiento del robot móvil tipo unicycle  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Las ecuaciones básicas del movimiento del robot móvil se muestran en (3.1) y (3.2), donde  $u$  constituye la velocidad lineal de todo el móvil,  $u_d$  y  $u_i$  constituyen las velocidades lineales de las ruedas derecha e izquierda respectivamente,  $\omega$  es la velocidad angular de la plataforma móvil y  $r$  la distancia paralela al eje motriz desde el centro geométrico del robot unicycle hacia el extremo de las ruedas (Fig. 2-3).

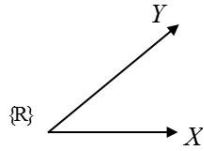
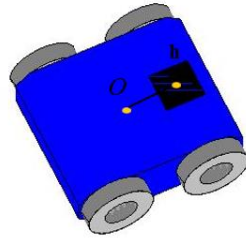
$$u = \frac{u_d + u_i}{2} \quad (3.1)$$

$$\omega = \frac{u_d - u_i}{R} \quad (3.2)$$

### 3.1.2. Modelo cinemático considerando el punto de interés

El modelo geométrico describe la posición de un objeto en el plano bidimensional (componente en  $x$ , componente en  $y$ ) y el ángulo  $\theta$  que describen una posición en función del punto de interés (el punto en el que se encuentra ubicada la estructura articular que sostiene las cámaras)  $h$ , como se ve en la Fig. 3-3, por lo que las coordenadas del modelo geométrico son simbolizadas por (3.3).

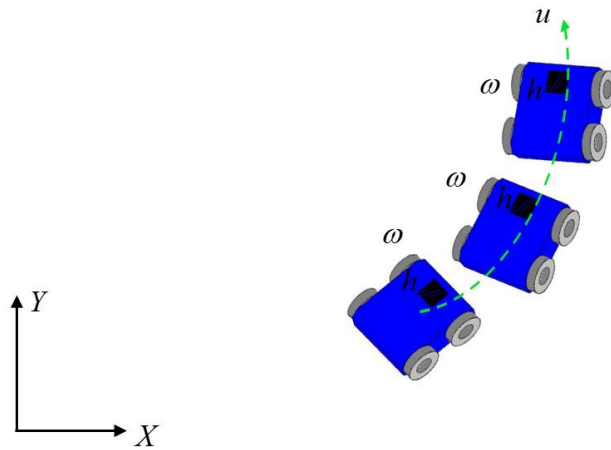
$$h_x = x, h_y = y, h_\theta = \theta \quad (3.3)$$



**Fig. 3-3** Posición del robot uniclo en el plano bidimensional  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

El modelo cinemático describe la posición de un objeto en movimiento (inyectando una velocidad lineal y angular como se muestra en la Fig. 4-3) y resulta de derivar cada componente del modelo geométrico, por lo que las componentes del modelo cinemático son simbolizadas por (3.4).

$$\begin{aligned}
 \dot{h}_x &= \dot{x} = u \cos \theta \\
 \dot{h}_y &= \dot{y} = u \sin \theta \\
 \dot{h}_\theta &= \dot{\theta} = \omega
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

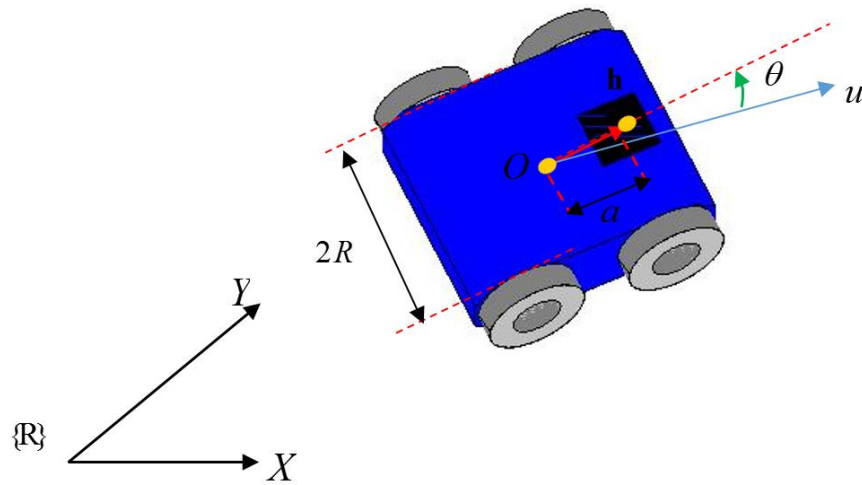


**Fig. 4-3** Posición del robot uniclo en movimiento (inyectándole una velocidad lineal y angular)  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 3.1.3. Modelo cinemático del robot móvil considerando la distancia desde el centro geométrico hasta el punto de interés

Considerando el punto de interés a una distancia  $a$  medida desde el punto  $O$  (Fig. 5-3), debido a que la estructura articular será montada en esta ubicación, obteniendo el modelo geométrico de (3.5).

$$\begin{aligned} h_x &= x + a \cos \theta \\ h_y &= y + a \sin \theta \\ h_\theta &= \theta \end{aligned} \quad (3.5)$$



**Fig. 5-3** Condiciones del modelo cinemático del robot unicycle  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Derivando (3.5) se obtiene el modelo cinemático del robot móvil tipo unicycle expresado en (3.6).

$$\begin{aligned} \dot{h}_x &= \dot{x} - a(\sin \theta)\dot{\theta} \\ \dot{h}_y &= \dot{y} + a(\cos \theta)\dot{\theta} \\ \dot{h}_\theta &= \dot{\theta} = \omega \end{aligned} \quad (3.6)$$

La plataforma móvil está caracterizada por su restricción de moverse paralelo al eje de las ruedas y está dada en la expresión (3.7).

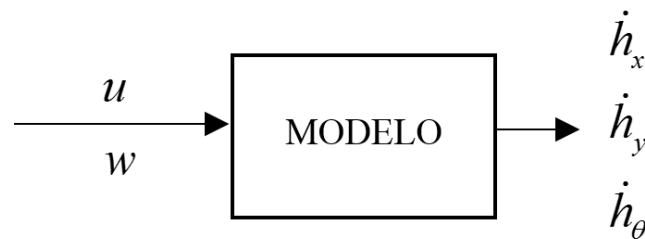
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}} &= \mathbf{J}\mathbf{v} \\ u &\Rightarrow m/s \\ w &\Rightarrow rad/s \\ \dot{h}_x &= \dot{x} - a(\sin \theta)\dot{\theta} = u \cos \theta - a\omega \sin \theta \\ \dot{h}_y &= \dot{y} + a(\cos \theta)\dot{\theta} = u \sin \theta + a\omega \cos \theta \end{aligned} \quad (3.7)$$



Es indispensable enunciar el modelo cinemático del robot móvil a partir de la velocidad lineal y angular, de esta forma se puede iniciar su movimiento, de tal manera se consigue el modelo cinemático expresado en (3.8).

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -a \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & a \cos(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

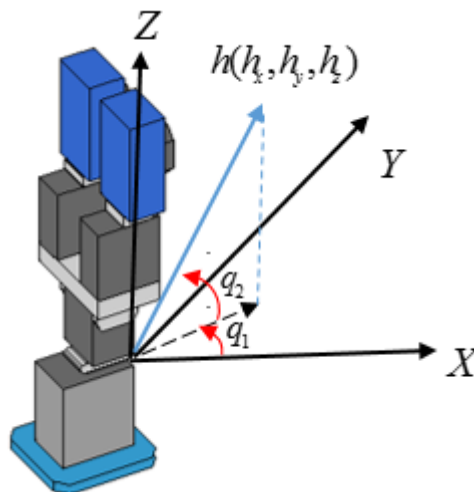
El modelo encontrado permite obtener el estado de las velocidades de salida (en el espacio y ángulo), a partir de las velocidades de entrada (velocidad lineal y angular) como se observa en la Fig. 6-3.



**Fig. 6-3** Esquema del modelo matemático en función de las velocidades.  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 3.2. Modelo de la estructura articular que sostiene las cámaras

La Figura 7-3 muestra la estructura articular sobre la cual se encuentran ubicadas las cámaras, la estructura está representada en el sistema de referencia de coordenadas globales (X, Y, Z).



**Fig. 7-3** Estructura articular que sostiene las cámaras  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Siendo  $\mathbf{h}$  la posición del punto de interés (extremo en el que se encuentran ubicadas las cámaras), la componente vectorial se encuentra representada en el sistema de referencia de coordenadas

locales, siendo  $(h_x, h_y, h_z)$  (3.9), (3.10), (3.11), respectivamente las componentes del punto  $\mathbf{h}$  respecto al sistema de referencia.

$$\begin{aligned}\cos q_2 &= \frac{h'_x}{l_2} \\ \cos q_1 &= \frac{h_x}{h'_x} \\ h'_x &= \frac{h_x}{\cos q_1} \\ \cos q_2 &= \frac{\frac{h_x}{\cos q_1}}{\frac{l_2}{1}} = \frac{h_x}{l_2 \cos q_1} \\ h_x &= l_2 \cos q_2 \cos q_1\end{aligned}\tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}\cos q_2 &= \frac{h'_x}{l_2} \\ \sin q_1 &= \frac{h_y}{h'_x} \\ h'_x &= \frac{h_x}{\cos q_1} \\ \sin q_1 &= \frac{h_y}{l_2 \cos q_2} \\ h_y &= l_2 \cos q_2 \sin q_1\end{aligned}\tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}\sin q_2 &= \frac{h_z}{l_2} \\ h_z &= l_2 \sin q_2\end{aligned}\tag{3.11}$$

Donde  $l_2$  es la dimensión de la estructura articular;  $q_1$  y  $q_2$  son los ángulos que se forman cuando gira la estructura articular (grados de libertad), combinando (3.9), (3.10), (3.11) en un sistema de ecuaciones se obtiene el grupo de ecuaciones presentadas en (3.12).

$$h_x = l_2 \cos q_2 \cos q_1 \quad h_y = l_2 \cos q_2 \sin q_1 \quad h_z = l_2 \sin q_2 \tag{3.12}$$

Derivando  $h_x$  de (3.12) se obtiene (3.13)

$$\begin{aligned}\dot{h}_x &= l_2 \left[ ((\cos q_2)' \cos q_1) + (\cos q_2 (\cos q_1)') \right] \\ \dot{h}_x &= -l_2 \dot{q}_2 \sin q_2 \cos q_1 - l_2 \dot{q}_1 \sin q_1 \cos q_2\end{aligned}\quad (3.13)$$

Derivando  $h_y$  de (3.12) se obtiene (3.14)

$$\begin{aligned}\dot{h}_y &= l_2 \left[ ((\cos q_2)' \sin q_1) + (\cos q_2 (\sin q_1)') \right] \\ \dot{h}_y &= -l_2 \dot{q}_2 \sin q_2 \sin q_1 + l_2 \dot{q}_1 \cos q_2 \cos q_1\end{aligned}\quad (3.14)$$

Derivando  $h_z$  de (3.12) se obtiene (3.15)

$$\begin{aligned}\dot{h}_z &= l_2 (\sin q_2)' \\ \dot{h}_z &= l_2 \dot{q}_2 \cos q_2\end{aligned}\quad (3.15)$$

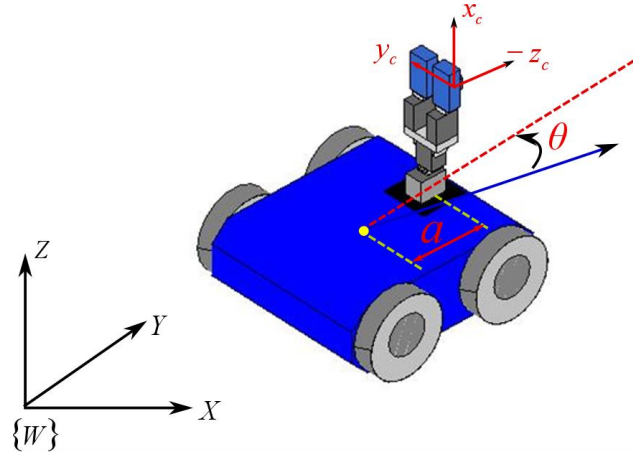
Representando (3.13), (3.14), (3.15) en el modelo cinemático matricial resumido se obtiene (3.16).

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{h}} &= \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{h}} &= \begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2 \cos q_2 \sin q_1 & -l_2 \cos q_1 \sin q_2 \\ l_2 \cos q_2 \cos q_1 & -l_2 \sin q_2 \sin q_1 \\ 0 & l_2 \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.16)$$

### 3.3. Modelo matemático del robot móvil y la estructura articular

#### 3.3.1. Modelo geométrico

Para lograr la modelación cinemática del robot móvil y la estructura articular en conjunto se utiliza la metodología explicada en cada modelo independiente es decir de la estructura articular y el robot móvil unicycle (por separado), en la Fig. 8-3 se representa el robot móvil con la estructura articular y sus respectivas condiciones para obtener el modelo cinemático.



**Fig. 8-3** Condiciones del modelo cinemático del robot móvil y la estructura articular

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Uniendo las componentes de las ecuaciones (3.3) y (3.12), se obtiene el modelo geométrico de la estructura articular y el robot móvil en conjunto (3.17).

$$\begin{aligned} h_x &= x + a \cos \theta + l_2 \cos q_2 \cos(\theta + q_1) \\ h_y &= y + a \sin \theta + l_2 \cos q_2 \sin(\theta + q_1) \\ h_z &= h + l_1 + l_2 \sin q_2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

### 3.3.2. Modelo cinemático

Derivando  $h_x$  de (3.17) se obtiene (3.18)

$$\begin{aligned} h'_x &= [x + a \cos \theta + l_2 \cos q_2 \cos(\theta + q_1)]' \\ [l_2 \cos q_2 \cos(\theta + q_1)]' &= l_2 [(\cos q_2)' \cos(\theta + q_1) + \cos q_2 (\cos \theta + q_1)'] \\ [l_2 \cos q_2 (\cos \theta + q_1)]' &= l_2 [-\dot{q}_2 (\sin q_2) (\cos \theta + q_1) - (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos q_2 \sin(\theta + q_1)] \\ [l_2 \cos q_2 (\cos \theta + q_1)]' &= -l_2 \dot{q}_2 (\sin q_2) (\cos \theta + q_1) - l_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos q_2 \sin(\theta + q_1) \\ \dot{h}_x &= \dot{x} - \dot{\theta} a \sin \theta - l_2 \dot{q}_2 (\sin q_2) (\cos \theta + q_1) - l_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos q_2 \sin(\theta + q_1) \\ \dot{h}_x &= u \cos \theta - \dot{\theta} a \sin \theta - l_2 \dot{q}_2 (\sin q_2) (\cos \theta + q_1) - l_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos q_2 \sin(\theta + q_1) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Derivando  $h_y$  de (3.17) se obtiene (3.19)

$$\begin{aligned} h'_y &= [y + a \sin \theta + l_2 \cos q_2 \sin(\theta + q_1)]' \\ \dot{h}_y &= \dot{y} + a \dot{\theta} \cos \theta + l_2 [-\dot{q}_2 \sin q_2 \sin(\theta + q_1) + \cos q_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos(\theta + q_1)] \\ \dot{h}_y &= u \sin \theta + a \dot{\theta} \cos \theta + l_2 [-\dot{q}_2 \sin q_2 \sin(\theta + q_1) + \cos q_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_1) \cos(\theta + q_1)] \end{aligned} \quad (3.19)$$

Derivando  $h_z$  de (3.17) se obtiene (3.20)

$$[h_z]' = [h + l_1 + l_2 \sin q_2]'$$

$$\dot{\mathbf{h}}_z = l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 \quad (3.20)$$

Representando (3.18), (3.19) y (3.20) en el modelo cinemático matricial resumido, se obtiene (3.21).

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{v}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -a \sin \theta - l_2 \cos q_2 \sin(\theta + q_1) & -l_2 \cos q_2 \sin(\theta + q_1) & -l_2 \sin q_2 \cos(\theta + q_1) \\ \sin \theta & a \cos \theta + l_2 \cos q_2 \cos(\theta + q_1) & l_2 \cos q_2 \cos(\theta + q_1) & -l_2 \sin q_2 \sin(\theta + q_1) \\ 0 & 0 & 0 & l_2 \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \dot{\theta} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

### 3.4. Modelo matemático de las cámaras

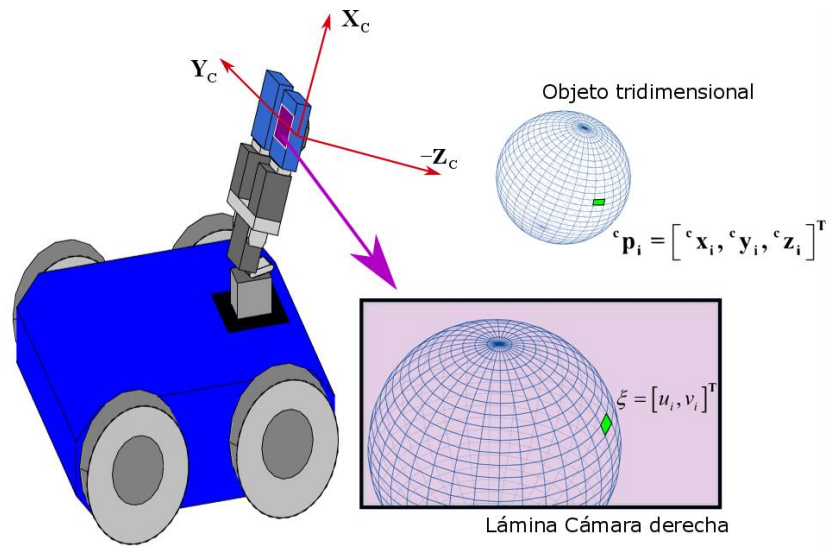
Sea un punto en el espacio tridimensional  ${}^c \mathbf{p}_i$  que será captado por el sensor fotográfico colocado en el extremo de la estructura articular que se encuentra empotrado en el robot móvil. Asumiendo que el lente óptico cumple la misma función que la apertura de una cámara Pinhole, la posición de un pixel es determinada en el plano de imagen con coordenadas  $\mathbf{u} - \mathbf{v}$ . Mediante las consideraciones de derivación de Euler, las velocidades de un elemento pueden obtenerse a través de sus posiciones con un tiempo de muestreo conocido, por lo tanto, el análisis de velocidad  $\dot{\xi}$  de cada uno de los puntos tridimensionales que se convierten en 2D vistos desde la cámara derecha (Fig. 9-3) se puede expresar con (3.22) y (3.23). De modo matricial, el modelo cinemático de las cámaras se presenta en (3.24), o de manera más abstracta en (3.25), teniendo en consideración que  ${}^c \mathbf{p}_i$  representa  $[{}^c \dot{x}_i, {}^c \dot{y}_i, {}^c \dot{z}_i]^T$ ,

$$\dot{u}_i = -\frac{f_c({}^c \dot{x}_i)}{{}^c z_i} + \frac{f_c({}^c x_i)({}^c \dot{z}_i)}{{}^c z_i^2} \quad (3.22)$$

$$\dot{v}_i = -\frac{f_c({}^c \dot{y}_i)}{{}^c z_i} + \frac{f_c({}^c y_i)({}^c \dot{z}_i)}{{}^c z_i^2} \quad (3.23)$$

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{f_c}{{}^c z_i} & 0 & -\frac{f_c({}^c x_i)}{{}^c z_i^2} \\ 0 & \frac{f_c}{{}^c z_i} & -\frac{f_c({}^c y_i)}{{}^c z_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c \dot{x}_i \\ {}^c \dot{y}_i \\ {}^c \dot{z}_i \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\dot{\xi} = -\mathbf{J}_{oi} {}^c \dot{\mathbf{p}}_i \quad (3.25)$$

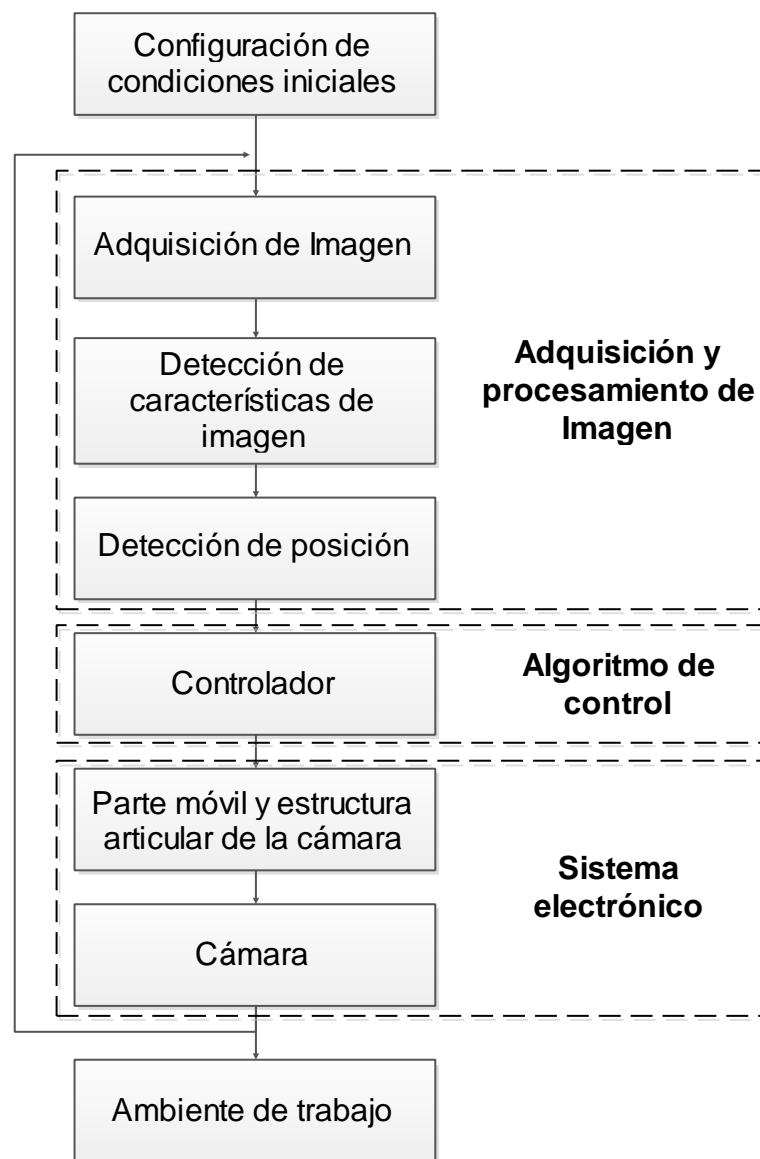


**Fig. 9-3** Observación de la cámara derecha  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO DE SEGUIMIENTO DE OBJETOS MEDIANTE VISIÓN

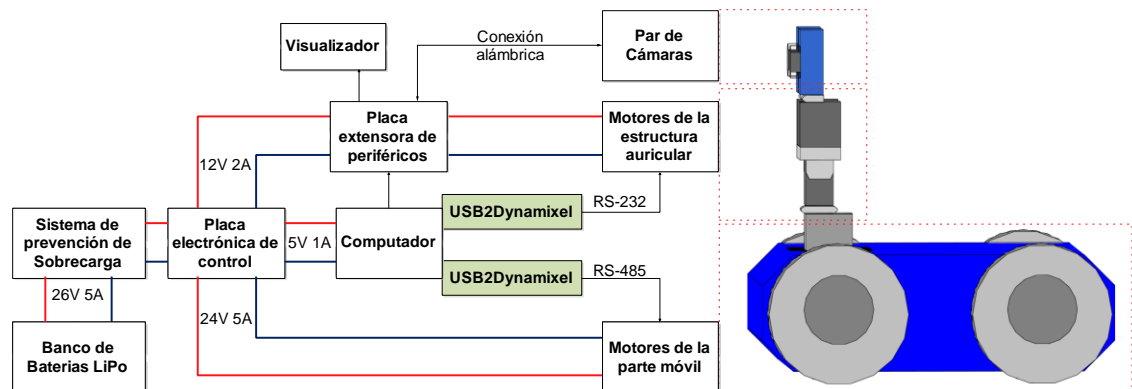
El diseño del sistema de seguimiento de objetos consta de 3 partes fundamentales: el diseño del sistema electrónico, adquisición y procesamiento de imagen y el algoritmo de control. Como se muestra en la Fig. 1-4, el funcionamiento se basa en un diagrama de flujo el cual incluye todas las etapas que serán descritas en esta sección.



**Fig. 1-4** Diagrama de flujo del diseño de seguimiento  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

#### 4.1. Diseño del sistema electrónico

El sistema electrónico está basado en las especificaciones técnicas requeridas para comandar la red de motores Dynamixel. En la Fig. 2-4 se describe la distribución de elementos y equipos y la conexión electrónica requerida. Considerando el diseño como partes de un todo, se puede distinguir 5 etapas para la ejecución final de la tarea. Estas etapas consisten en un banco de baterías, una placa electrónica de control, una placa extensora de periféricos, el computador, los motores de la parte móvil y de la estructura articular y el par de cámaras para la detección de imagen.

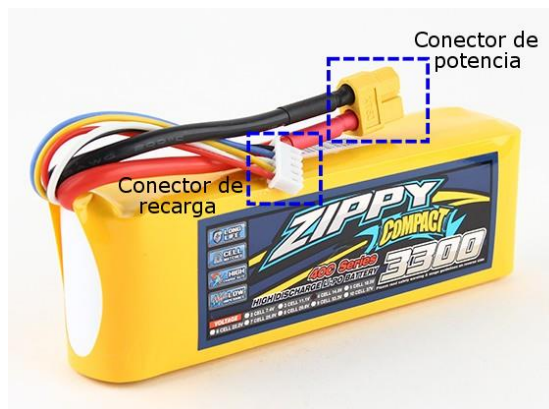


**Fig. 2-4** Distribución del sistema electrónico

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

##### 4.1.1. Banco de baterías y circuito de protección

Un banco de 4 baterías LiPo de 26V es dispuesto para la alimentación general del sistema, el cual incluye una etapa que detecta y suprime posibles cortocircuitos generados por conexiones fallidas o sobre carga producida por los motores. Los almacenadores de energía son los presentados en la Fig. 3-4, en la cual se visualizan los conectores usados para recargar las baterías así como conectores de potencia para aplicar las cargas.



**Fig. 3-4** Baterías LiPo

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



#### **4.1.2. Placa electrónica de control**

La placa electrónica de control regula y distribuye voltajes de alimentación a todo el sistema de motores y la computadora. La placa electrónica contiene elementos que miden la magnitud de corriente y voltaje de las baterías, mientras presenta dichos valores en un LCD (Display de cristal líquido) montado en una parte visible del vehículo. Previo a un arranque total del sistema, la placa genera una revisión de posibles mal conexiones y sobrecargas, generando secuencias de sonido dependientes de la respuesta.

Considerando las características de las baterías LiPo, una etapa para la desconexión en caso de una sobre descarga es integrada en la placa electrónica de control. En esta, los voltajes son medidos constantemente durante el tiempo de trabajo del vehículo. En caso de una detección de descarga por debajo de los 21 V, una secuencia de sonidos de alarma es emitida para excitar a un buzzer colocado en la placa extensora. En un caso extremo de sobre descarga, el sistema desconecta las baterías independientemente de la decisión del operario, cuyo restablecimiento es solo llevado a cabo cuando los voltajes estén en un rango apto de carga.

#### **4.1.3. Placa extensora de periféricos**

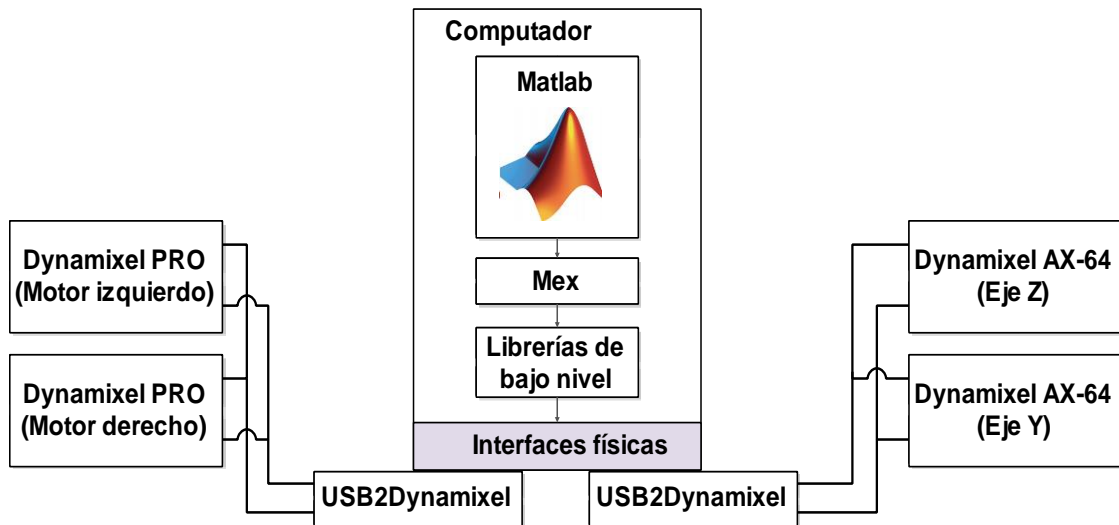
El ambiente de trabajo del vehículo incluye ambientes no estructurados que podrían poner en riesgo el sistema de control principal ubicado en el computador. A consecuencia, el diseño estructural del robot impide que los periféricos del ordenador estén en una superficie accesible, obligando a crear una placa electrónica de comunicación entre la computadora y dispositivos ubicados fuera del robot. En la placa extensora, elementos de visualización de información, un emisor de sonido, extensores USB 2.0 y 3.0, HDMI y salidas de potencia regulada a 24V, 12V y 5V son ubicados. De igual manera, un pulsador para el encendido y apagado de la computadora se encuentra en la superficie accesible superior del vehículo.

#### **4.1.4. Computador**

El computador contiene instalado sobre el sistema operativo Windows software necesario para la comunicación de los motores con el controlador, la conexión con la cámara y la ejecución del controlador. A través de la placa extensora, diversos dispositivos pueden ser conectados mediante las interfaces USB y HDMI. Aparte de las interfaces físicas, el ordenador está dotado de antenas que permiten comunicación WiFi para generar conexiones remotas y comunicaciones con dispositivos externos.

#### 4.1.5. Motores

El conjunto de actuadores consta de 2 motores Dynamixel PRO y 2 Dynamixel AX-18. A diferencia de motores a pasos o los comandados por frecuencia, estos motores poseen un microcontrolador interno controlado por una trama de comunicación serial. Para la comunicación entre las interfaces USB del ordenador y la red de motores inteligentes, el dispositivo USB2Dynamixel es utilizado. Con el objetivo de eliminar errores de entramado, las librerías SDK de Robotis son usadas para generar un puente lógico directo entre el software donde está programado el controlador y el USB2Dynamixel.



**Fig. 4-4** Conexión lógica directa de la red de motores y Matlab

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

La Fig. 4-4 presenta la conexión lógica directa de la red de motores y el software donde está programado el controlador. En ésta, se describe el uso del SDK (Software Developer Kit) con el cual se genera un puente lógico directo para comandar y recibir información de los motores.

#### 4.1.6. Cámaras

La información visual del objetivo a seguir es provista por un par de cámaras de la marca Genius. Las cámaras están colocadas a 5 cm de diferencia la una de la otra sobre el eje horizontal, donde el sensor fotográfico derecho es usado de referencia para realizar los cálculos de triangulación. Las cámaras se ajustan a los requerimientos de peso y dimensiones necesarias para ser colocadas sobre el punto de interés. La Fig. 5-4 muestra una de las cámaras usadas en el diseño estructural.



**Fig. 5-4** Cámara usada para la adquisición de imagen  
**Fuente:** Life Shot FHD300 Spanish manual Genius.

## 4.2. Visión y adquisición de imagen

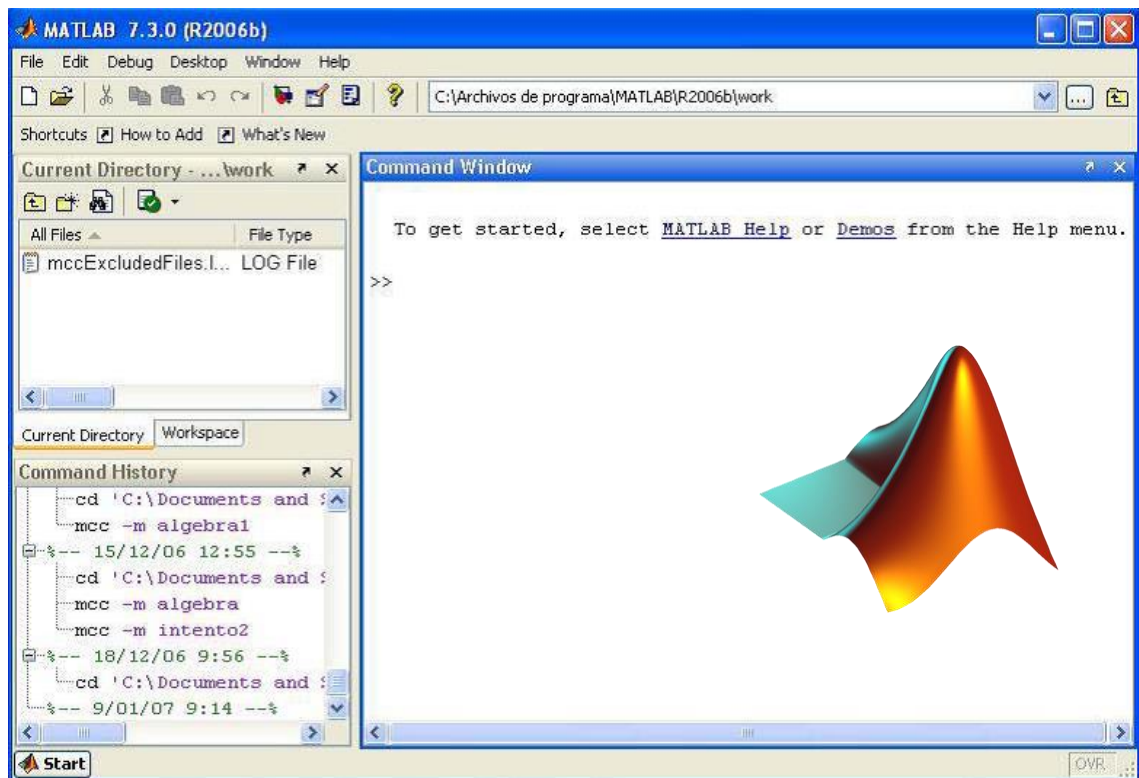
La adquisición de las características de la imagen se realiza mediante dos cámaras paralelas que ubican a un mismo objetivo. El uso de las funciones de visión que posee Matlab facilitan este proceso, permitiendo ubicar al objetivo en el plano de imagen  $(u, v)$  de cada cámara y determinando la posición real en el espacio  $(x, y, z)$  mediante el análisis estereoscópico. La ubicación del objetivo está basado al sistema de referencia de la cámara derecha, considerando a la profundidad uno de los parámetros esenciales para la ubicación del objetivo.

La estimación de velocidad del objetivo utiliza los resultados del análisis estereoscópico que entrega la posición espacial en cada instante de tiempo, y aplicando un filtro de estimación (derivada respecto al tiempo) se calculan las velocidades lineales  $[m/s]$  del objetivo.

Este capítulo presenta las etapas para el reconocimiento de objetos, incluyendo el software usado para la adquisición de imágenes, las librerías usadas para la conexión con las cámaras web, las librerías para la detección de objetos y la triangulación del objeto mediante el uso del par de imágenes.

### 4.2.1. *Software usado para el tratamiento de imagen*

La adquisición y procesamiento de las imágenes provistas se llevan a cabo a través del software de desarrollo MATLAB de MathWorks. Matlab se caracteriza por sus librerías matemáticas, lenguaje interpretado y manejo de matrices, además de incluir soportes a diversos dispositivos externos. El presente trabajo usa las librerías de procesamiento de imagen que facilitan implementar y ejecutar el algoritmo de control. El entorno de trabajo de Matlab es presentado en la Fig. 6-4.



**Fig. 6-4** Interfaz de usuario de Matlab  
Fuente: MATLAB (Image Acquisition Toolbox™)

#### 4.2.2. *Adquisición de imágenes*

El paquete de adquisición de imagen de MATLAB (Image Acquisition Toolbox™) provee funciones y bloques de programación que permiten conectar cámaras científicas e industriales tanto al entorno de MatLab como en Simulink. El toolbox permite además configurar propiedades de hardware y seleccionar modo de adquisición tales como procesamiento en lazo, activación por hardware, adquisición de segundos planos y sincronización con múltiples dispositivos. El paquete de adquisición soporta marcas reconocidas y una gran cantidad de estándares, incluyendo USB3 Vision, GigE Vision®, y GenICam™ GenTL. Dentro de este grupo de hardware admitido, el uso de las cámaras web es totalmente intuitivo y de librerías adicionales de terceros para capturar la información visual provista por el entorno es no requerida.

#### 4.2.3. *Librerías para conexión de las cámaras web*

Las librerías interpretan a cada cámara detectada como un objeto al que se le pueden configurar características. Sin el uso de un asistente, el comando 'webcam' es usado para crear un objeto de cámara y luego usarse la función snapshot para adquirir imágenes de la Webcam. Es posible adquirir una sola imagen o configurar un lazo de control para adquirir varias imágenes. Para probar la adquisición de datos de la cámara, la función **preview** puede ser usada. Además, se puede configurar las propiedades específicas del dispositivo, como la resolución y el brillo. Las

propiedades varían dependiendo del dispositivo, las cuales se pueden visualizar en la ventana de comandos usando el nombre del objeto. Las propiedades básicas de una cámara web se describen en la Tabla 1-4, en la Tabla 2-4 se describen los comandos usados en la adquisición de datos en la webcam.

**Tabla 1-4** Propiedades de una cámara web

<b>Object-Specific Property</b>	<b>Description</b>
Name	Propiedad de sólo lectura que especifica el nombre de la cámara.
Resolution	Especifica la resolución de vídeo (ancho x alto) entrante del objeto de la cámara web actual. Por lo general, las webcams admiten la adquisición de imágenes en varias resoluciones y puede cambiarse la resolución utilizando esta propiedad y el nombre del objeto. El valor predeterminado que se utiliza es la resolución predeterminada de la cámara. Utilice esta sintaxis para cambiarlo: <code>cam.Resolution = '160x120';</code>
AvailableResolutions	Muestra la lista de todas las resoluciones disponibles para la Webcam seleccionada, de la siguiente manera:  <code>Cam.AvailableResolutions</code>  <code>ans =</code> <code>'320x240'</code> <code>'160x120'</code> <code>'80x60'</code>
FrameRate	Muestra los frames por segundo para la adquisición

**Fuente:** paquete de adquisición de imagen de MATLAB, Image Acquisition Toolbox™ (Propiedades básicas de la cámara web)

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

**Tabla 2-4** Comandos para la adquisición de imagen

<i>webcamlist</i>	Sirve para obtener la lista de Webcams disponibles conectadas a su sistema operativo. La función devuelve un vector con los nombres de cámaras conectadas. Para luego poder utilizar el nombre de la cámara y crear el objeto Webcam para la adquisición de imágenes.
<i>webcam</i> ( <i>devicenumber</i> )	Crea un objeto vinculado a una cámara web donde devicenumber es un valor escalar numérico que identifica una Webcam en particular por su número de índice. Cuando utiliza la función webcam con un índice como argumento de entrada, crea el objeto correspondiente a ese índice y lo conecta a esa cámara.
<i>img =</i> <i>snapshot(cam)</i>	Adquiere una sola imagen de la cámara Web y la asigna a la variable img. La función <i>snapshot</i> devuelve el fotograma actual. Invocar <i>snapshot</i> en un lazo devuelve una nueva imagen cada vez. La imagen devuelta siempre es una imagen RGB. <i>snapshot</i> utiliza la resolución predeterminada de la cámara u otra resolución que se especifique utilizando la propiedad Resolución.

**Fuente:** paquete de adquisición de imagen de MATLAB, Image Acquisition Toolbox™ (Comandos en la adquisición de datos de la web cam)

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

#### 4.2.4. Librerías para la detección de objetos

Dentro de las librerías de Matlab, existen librerías pre-programadas para el procesamiento de imágenes. Estas funciones utilizan métodos matemáticos para resolver problemas de visión artificial, donde uno de los métodos matemáticos más conocidos es la transformada de Hough. Dado el requerimiento de localización de círculos en el plano de imagen en el presente trabajo, la función *imfindcircles* es usada. La función  $centers = imfindcircles(A, radius)$  encuentra los círculos en la imagen A, cuyos radios son aproximadamente iguales a *radius*. La salida, centers, es una matriz de dos columnas que contiene las coordenadas *u*, *v* de los centros de los círculos en la imagen. Adicionalmente, esta función permite la configuración mediante el ingreso de argumentos con su respectivo valor en pares. Argumentos de Nombre y Valor pueden especificar los pares opcionales, siempre y cuando el nombre aparezca dentro de apostrofes (''). La función puede especificar varios argumentos de par de nombre y valor en cualquier orden como Nombre 1, Valor 1, ..., Nombre N, Valor N. A continuación se describen los posibles argumentos en la Tabla 3-4.

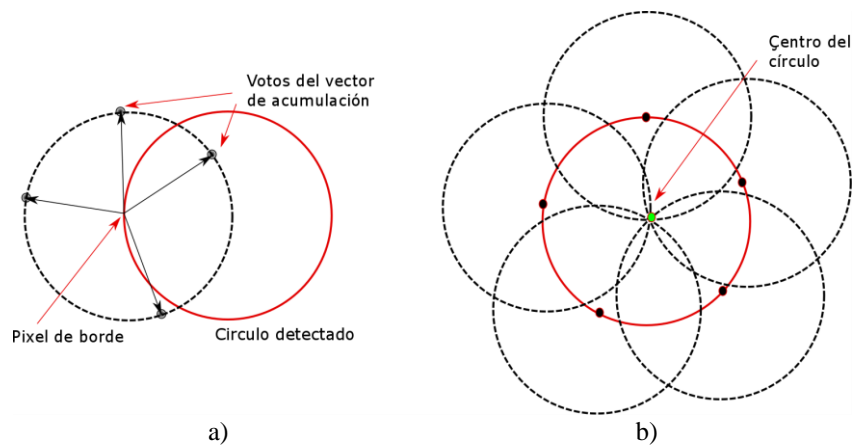
**Tabla 3-4** Argumentos de la función imfindcircles

<b>'ObjectPolarity'</b>	La polaridad del objeto indica si los objetos circulares son más brillantes o más oscuros que el fondo, especificado como el par separado por comas que consiste en 'ObjectPolarity' y cualquiera de los valores de la tabla siguiente. <i>'bright'</i> .- El objeto circular es más brillante que el fondo. <i>'dark'</i> .- El objeto circular es más oscuro que el fondo.
<b>'Method'</b>	El método de cálculo es la técnica utilizada para calcular las posiciones de los círculos, especificada como el par separado por comas que consiste en 'Method' y cualquiera de los valores de la siguiente tabla. <i>'PhaseCode'</i> .- Atherton y Kerbyson método de codificación de fase. Este es el valor predeterminado. <i>'TwoStage'</i> .- Es el método utilizado en la transformación circular de Hough de dos etapas
<b>Sensitivity</b>	El factor de sensibilidad es la sensibilidad para la detección de círculos de la transformada de Hough circular, especificada como el par separado por comas que consiste en "Sensitivity" y un valor escalar no negativo en el rango [0,1]. A medida que aumenta el factor de sensibilidad, imfindcircles detecta más objetos circulares, incluyendo círculos débiles y parcialmente oscurecidos. Los valores de sensibilidad más altos también aumentan el riesgo de falsa detección.
<b>EdgeThreshold</b>	Determina el umbral de gradiente para determinar píxeles de borde en la imagen, especificado como el par separado por comas que consiste en 'EdgeThreshold' y un valor escalar no negativo en el rango [0,1]. Especifique 0 para establecer el umbral en la magnitud del gradiente cero. Especifique 1 para establecer el umbral a la magnitud máxima del gradiente. Imfindcircles detecta más objetos circulares (con bordes débiles y fuertes) cuando se establece el umbral a un valor inferior. Detecta menos círculos con bordes débiles a medida que aumenta el valor del umbral.

**Fuente:** paquete de adquisición de imagen de MATLAB, Image Acquisition Toolbox™ (Argumentos para la configuración de la función imfindcircles)

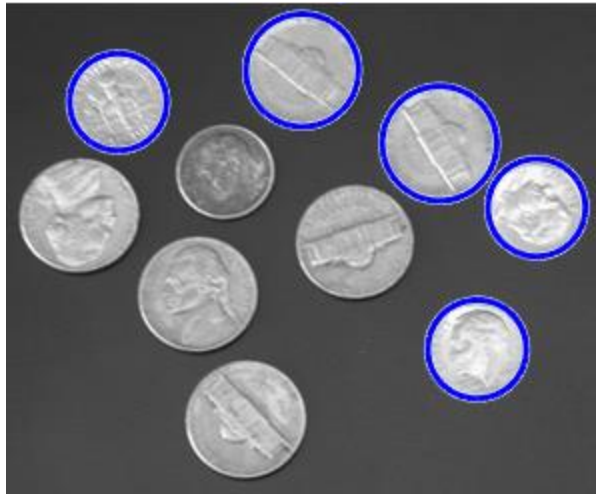
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

La función `imfindcircles` usa un algoritmo basado en la transformada circular de Hough (CHT, Circular Hough Transform) para detectar un patrón de líneas circulares en la imagen proporcionada. Este enfoque es usado debido a la robustez en la presencia de ruido, variación de iluminación y oclusión. Para la detección de círculos, el algoritmo usualmente sigue 3 pasos esenciales para la detección de los objetivos: i) la computación del array de acumulación, donde los píxeles de fondo con gradiente alta son designados como píxeles candidatos y se les permite emitir 'votos' en el vector acumulador. Los píxeles candidatos escogen un patrón alrededor del mismo que forma un círculo completo de radio fijo (Fig. 7-4 (a)). En la ii) estimación del centro, los votos de los píxeles candidatos pertenecientes al círculo en una imagen tienden a acumular en el compartimiento del acumulador correspondiente al centro del círculo. Por tanto, el centro de un círculo se calcula detectando los picos en el conjunto de acumuladores. La Fig. 7-4 (b) presenta la detección del centro de un círculo. Finalmente, la iii) el radio es calculado una vez se conozcan los anteriores parámetros.



**Fig. 7-4** Algoritmo de la transformada circular de Hough: a) vector de acumulación, b) detector de centro del círculo  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

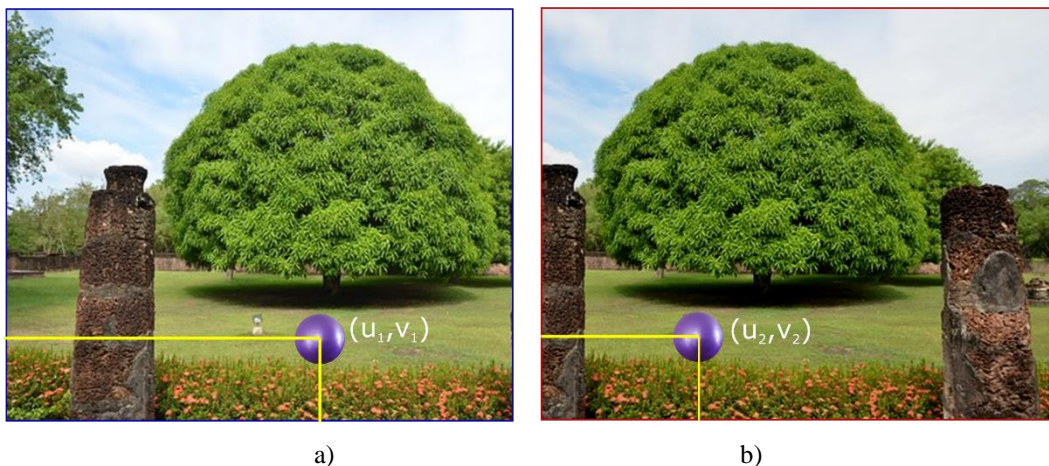
La Fig. 8-4 presenta el resultado de aplicar la función mencionada a una imagen que contiene múltiples formas circulares. En esta, se presenta la selección de elementos que cumplen condiciones de magnitud de radio y color.



**Fig. 8-4** Detección de formas circulares con radio definido  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

#### 4.2.5. *Triangulación del objeto mediante visión estéreo*

El proceso de triangulación se lleva a cabo bajo la condición de que ambas cámaras estén alineadas y se conozca su distancia focal. Para facilitar el proceso de reconocimiento del mismo objetivo, ambas cámaras se configuran de manera similar en los parámetros de brillo, contraste, entre otros. Sin embargo, la autoconfiguración para adaptar el sensor fotográfico a los cambios de luz produce una diferencia despreciable en los contrastes de ambas cámaras, como se muestra en la Fig. 9-4.



**Fig. 9-4** Imágenes obtenidas por las cámaras: izquierda (a) y derecha (b)  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

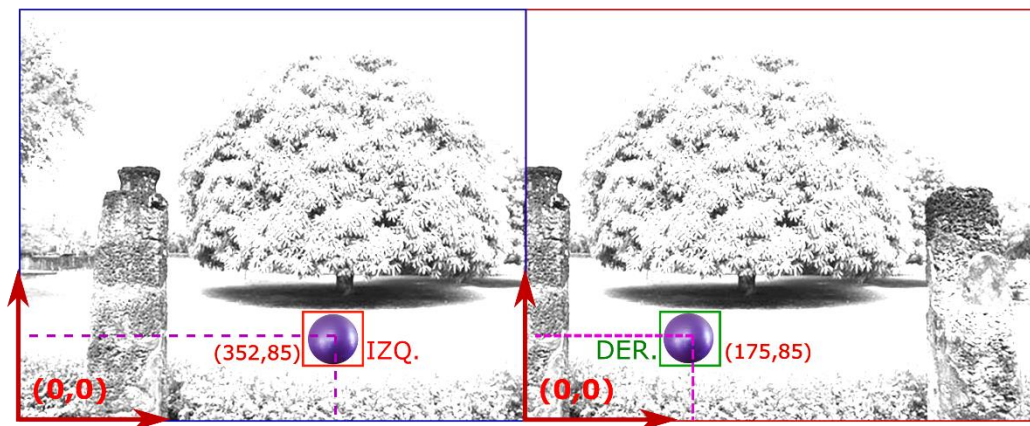
Las imágenes obtenidas tanto por la cámara derecha como por la cámara izquierda son sometidas a un proceso de cambio a grises para facilitar que la transformada de Hough ubique los objetos circulares. La transformada de Hough ejecutada para el reconocimiento de circunferencias en cada una de las imágenes retorna un par de posiciones del centro del objeto circular en píxeles (Fig. 10-4).



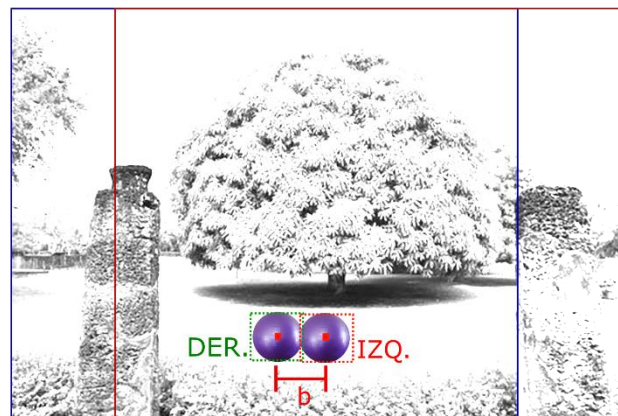
La diferencia de posición de las cámaras en el eje X (referencia general) ocasiona que el objeto en el plano de imagen de ambas cámaras no se encuentre en la misma ubicación en píxeles, generando un desplazamiento

$$b = x_1 - x_2 \quad (1-4)$$

Como se muestra en la Fig. 11-4. Notando que la distancia más cercana al eje de coordenadas del plano de imagen es obtenida por la cámara derecha, el punto central del blanco ubicado por ésta cámara es considerado el eje de referencia para calcular la profundidad del objeto.



**Fig. 10-4** Escalamiento a grises y ubicación del objeto en el plano u, v de ambas imágenes  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 11-4** Obtención del parámetro b para discriminar la profundidad del objeto  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Analíticamente, el análisis de triangulación se lleva a cabo partiendo del modelo de la cámara derecha definido como

$$u_1 = \frac{-f_c x_1}{z_1}, v_1 = \frac{-f_c y_1}{z_1} \quad (2-4)$$

y de la izquierda como

$$u_2 = \frac{-f_c x_2}{z_2}, v_2 = \frac{-f_c y_2}{z_2} \quad (3-4)$$

El planteamiento del modelo asume que la profundidad del objeto visto por ambas cámaras es el mismo, por tanto,  $z_1 = z_2 = z$ , redefiniendo las ecuaciones en el plano de imagen horizontal como

$$u_1 = \frac{-f_c x_1}{z} \quad (4-4)$$

$$u_2 = \frac{-f_c x_2}{z} \quad (5-4)$$

Para conocer el valor de profundidad, en (4-4) se reemplaza el valor equivalente de  $x_1$  obtenido de (1-4), obteniendo (6-4).

$$u_1 = \frac{-f_c (b + x_2)}{z} \quad (6-4)$$

El valor equivalente de despejar  $x_2$  de (5-4) permite obtener (7-4)

$$u_1 = \frac{-f_c (b + \frac{u_2 z}{f_c})}{z} \quad (7-4)$$

Posteriormente, de (7-4) se despeja la variable deseada mediante (8-4), con lo cual se puede conocer el valor de  $z$  establecido como (9-4)

$$u_1 z = -f_c * b + u_2 z, u_1 z - u_2 z = -f_c * b \quad (8-4)$$

$$z = \frac{-f_c * b}{u_1 - u_2} \quad (9-4)$$

Una vez conocido el valor de profundidad, el movimiento del objeto en los planos horizontal y vertical de la referencia general son definidos como (10-4) y (11-4):

$$x_1 = \frac{-u_1 z}{f_c} \quad (10-4)$$

$$y_1 = \frac{-v_1 z}{f_c} \quad (11-4)$$

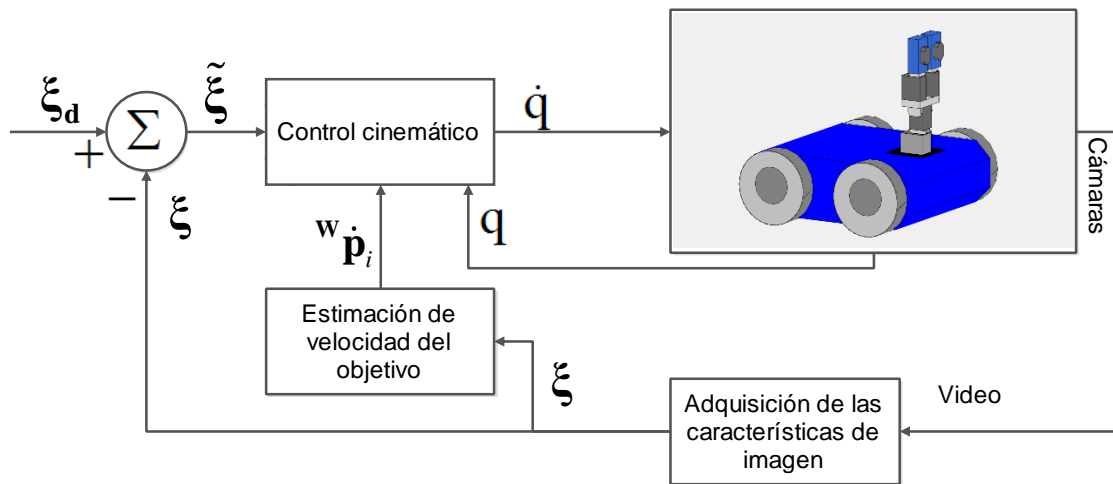
Donde  $x_1 = x$  y  $y_1 = y$  dado que la cámara izquierda es usada simplemente para determinar la profundidad.

### 4.3. Esquema de control

El esquema de control se basa en el modelo cinemático del sistema compuesto por el robot móvil y la estructura articular de las cámaras, así como el modelo de imagen de cada cámara.

Combinando ambos modelos y aplicando la cinemática inversa del sistema completo, se obtienen las velocidades para el robot móvil y para los grados de libertad de la estructura articular.

El sistema de control cinemático propuesto para el seguimiento de objetivos mediante retroalimentación visual se presenta en la Fig. 12-4.



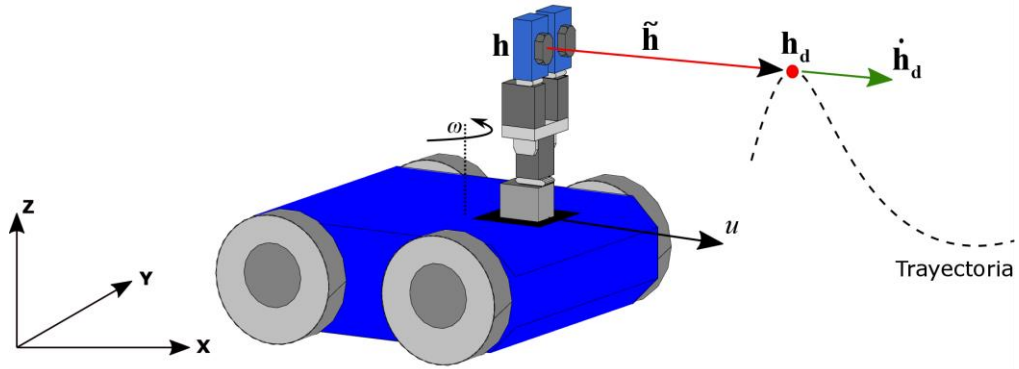
**Fig. 12-4** Esquema de control para seguimiento de objetos mediante visión

Realizado por: Marlon Santamaría Villacis

Esta sección presenta una propuesta de control cinemático basada en (i) el control cinemático asumiendo que el extremo donde está situada la cámara es un punto de interés y (ii) el control cinemático basado en retroalimentación visual.

#### 4.3.1. Control cinemático con un punto de interés

El control cinemático es el encargado de mantener el punto de interés sobre una trayectoria deseada (Fig. 13-4). Asumiendo el que el robot estará en una posición inicial lejana a la deseada, el control cinemático fuerza a que el robot alcance la posición esperada y la mantenga con errores cercanos a cero. Los errores son calculados a partir de posiciones y velocidades deseadas, ambos dependientes del tiempo.



**Fig. 13-4** Variables inmersas en el seguimiento de trayectorias  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Una vez obtenido el modelo cinemático de la base móvil y la estructura articular, el método de cinemática diferencial inversa es aplicado (12-4). En el método de cinemática inversa, las velocidades de control son representadas por  $v_c(t) = [u \ \omega \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2]$ , mientras que  $\mathbf{h}_d(t) = [h_{xd} \ h_{yd} \ h_{zd}]$  son las posiciones deseadas y  $\dot{\mathbf{h}}_d(t) = [\dot{h}_{xd} \ \dot{h}_{yd} \ \dot{h}_{zd}]$  representan las velocidades lineales deseadas para la estructura articular que sostiene las cámaras. Las velocidades deseadas  $\dot{\mathbf{h}}_d(t)$  pueden ser generadas ya sea para el seguimiento de la trayectoria o según los movimientos requeridos por el operador. Adicional a las velocidades de control, velocidades deseadas y posiciones deseadas, (12-4) incluye una matriz Jacobiana  $\mathbf{J}$  de  $3 \times 5$ , de la cual no se puede obtener una inversa directa, sino una pseudoinversa basándose en Moore Penrose ( $\mathbf{J}^\# = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ ).

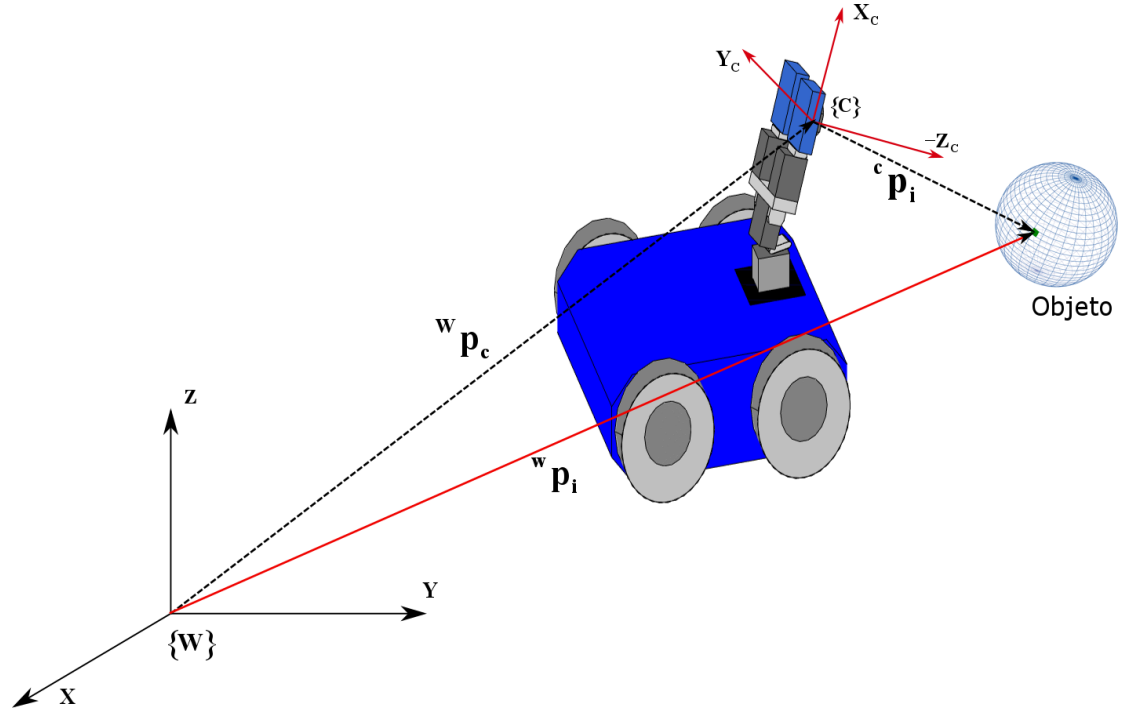
$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{J}^\#(\mathbf{q})\dot{\mathbf{h}}_d(t) \quad (12-4)$$

Para reducir los errores de posición del punto de interés dada una trayectoria, (13-4) es propuesta. En ésta, una función  $\tanh(\cdot)$  es incluida para saturar la inexactitud calculada  $\tilde{\mathbf{h}}(t) = [\tilde{h}_x \ \tilde{h}_y \ \tilde{h}_z]$ , donde los errores de posición son obtenidos por  $\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}_p(t) - \mathbf{h}(t)$ . Adicionalmente, dos matrices diagonales constantes para corregir pequeños errores de posición y limitar velocidades del robot a las máximas permitidas son incluidas, las mismas representadas por  $\mathbf{K}_1$  y  $\mathbf{K}_2$ , respectivamente.

$$\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{J}^\#(\mathbf{q})(\dot{\mathbf{h}}_d(t) + \mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{K}_2^{-1}\mathbf{K}_1\tilde{\mathbf{h}}(t))) \quad (13-4)$$

### 4.3.2. Control cinemático mediante realimentación visual

Dado que el objeto a seguir está ubicado en el espacio, una interpretación que unifique ambas referencias, la de la cámara y la del observador, es necesaria. (14-4) presenta la solución de dicha interpretación basándose en el análisis de la Fig. 14-4, donde se presentan los vectores que separan la referencia del mundo con la referencia de la cámara, teniendo como resultado la inclusión de la matriz  ${}^c\mathbf{R}_w$ . La inclusión de la matriz  ${}^c\mathbf{R}_w$  permite rotar el eje visto por la cámara (donde la profundidad es Z) e igualarlo al eje normal visto del mundo.



**Fig. 14-4** Unificación de la referencia general con la referencia de la cámara  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

$${}^c\mathbf{p}_i = {}^c\mathbf{R}_w \left( {}^w\mathbf{p}_i - {}^w\mathbf{p}_c \right) \quad (14-4)$$

La descripción de velocidad de un punto del objeto real respecto a la referencia general se da por (15-4). En ésta, se identifica la diferencia de movimiento entre un punto  $i$  visto desde la referencia general  $\{W\}$  y el mismo punto capturado por el sensor  $\{C\}$ . La matriz de rotación no sufre ningún cambio por tratarse de una constante.

$${}^c\dot{\mathbf{p}}_i(t) = {}^c\mathbf{R}_w \left( {}^w\dot{\mathbf{p}}_i(t) - {}^w\dot{\mathbf{p}}_c(t) \right) \quad (15-4)$$

Sustituyendo  ${}^c\dot{\mathbf{p}}_i(t)$  en (3.25), se tiene (16-4),

$$\dot{\xi}(t) = -\mathbf{J}_{oi}(\mathbf{q}) {}^c\mathbf{R}_w \left( {}^w\dot{\mathbf{p}}_i(t) - {}^w\dot{\mathbf{p}}_c(t) \right) \quad (16-4)$$

Afín de incluir el signo en la ecuación y expandirla, se tiene (17-4),

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{J}_{o_i}(\mathbf{q})^c \mathbf{R}_W^W \dot{\mathbf{p}}_c(t) - \mathbf{J}_{o_i}(\mathbf{q})^c \mathbf{R}_W^W \dot{\mathbf{p}}_i(t) \quad (17-4)$$

Sabiendo que  ${}^W \dot{\mathbf{p}}_c(t) = \dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}_g(\mathbf{q})\mathbf{v}(t)$  y representando  $\mathbf{J}_o(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_{o_i}(\mathbf{q})^c \mathbf{R}_W^W$ , presenta otra manera de representar la velocidad de desplazamiento de un objeto en el plano de imagen.

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{J}_{o_i}(\mathbf{q})^c \mathbf{R}_W^W \mathbf{J}_g \mathbf{v}(t) - \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^W \dot{\mathbf{p}}_i(t) \quad (18-4)$$

Para reducir la notación asumiendo que existe una sola matriz Jacobiana, la igualdad

$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_{o_i}(\mathbf{q})^c \mathbf{R}_W^W \mathbf{J}_g(\mathbf{q})$  permite tener  $\dot{\xi}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{v}(t) - \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^W \dot{\mathbf{p}}_i(t)$ , teniendo a  $\mathbf{v}$  en (19-4) como la velocidad aplicada a los motores para llevar a cabo las acciones de control.

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{J}^\#(\mathbf{q}) \left( \dot{\xi}(t) + \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^W \dot{\mathbf{p}}_i(t) \right) \quad (19-4)$$

De manera similar al control de posición con un punto de interés, la función  $\tanh(\cdot)$  es incluida para saturar la inexactitud calculada en el plano en pixeles  $\tilde{\xi}(t) = [\tilde{u}_i \ \tilde{v}_i]$ , donde los errores de posición son obtenidos por  $\tilde{\xi}(t) = \xi_d(t) - \xi(t)$ . Adicionalmente, una matriz diagonal constante  $\mathbf{K}_1$  para corregir errores de posición y una matriz  $\mathbf{K}_2$  para limitar velocidades del robot a las máximas permitidas son incluidas. De esta manera, la ley de control presentada en (20-4) es propuesta.

$$\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{J}^\#(\mathbf{q}) \left( \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^W \dot{\mathbf{p}}_i(t) + \mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{K}_1 \tilde{\xi}(t)) \right) \quad (20-4)$$

#### 4.4. Análisis de estabilidad del control cinemático

El análisis de estabilidad permite asegurar que el esquema de control propuesto funciona para cualquier caso, es decir, el error de seguimiento al objetivo siempre tiende a cero. Para el análisis de estabilidad se utiliza el método de Lyapunov para demostrar que los errores de control tiendan a cero asintóticamente cuando el tiempo tienda a infinito.

Se escoge una función candidata que represente el error del sistema, para lo cual se considera un seguimiento perfecto de velocidad en el robot  $\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{v}(t)$ , y se considera la siguiente igualdad  $\mathbf{J}_o(\mathbf{q})^W \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \dot{\xi}(t)$ , por lo cual se tiene la ecuación de lazo cerrado.

$$\dot{\xi}(t) + \mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{K}_1 \tilde{\xi}(t)) = 0 \quad (21-4)$$

Al reagrupar se obtiene,

$$\dot{\tilde{\xi}}(t) = -\mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{K}_1 \tilde{\xi}(t)) \quad (21-5)$$

Para realizar el análisis de estabilidad, se determina una función candidata de Lyapunov positiva, usando los errores cuadráticos

$$V(\tilde{\xi}) = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T(t) \tilde{\xi}(t) \quad (21-6)$$

Al derivar la candidata de Lyapunov se obtiene,

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\xi}) &= \frac{1}{2} \dot{\tilde{\xi}}^T(t) \tilde{\xi}(t) + \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T(t) \dot{\tilde{\xi}}(t) \\ \dot{V}(\tilde{\xi}) &= \dot{\tilde{\xi}}^T(t) \tilde{\xi}(t) \end{aligned} \quad (21-7)$$

Al combinar las expresiones matemáticas se consigue

$$\dot{v}(\tilde{\xi}) = -[\mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{K}_1 \tilde{\xi}(t))] \dot{\tilde{\xi}}^T(t) \quad (21-8)$$

Recordando los requerimiento para la estabilidad,  $\dot{v}(\tilde{\xi})$  debe ser negativa para cualquier caso, por lo cual las matrices  $\mathbf{K}_2 > 0$ ,  $\mathbf{K}_1 > 0$  deber ser positivas. De esta manera se determina que la ley de control es asintóticamente estable, es decir, el error en el plano de imagen tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito.

$$\tilde{\xi}(t) \rightarrow 0 \text{ con } t \rightarrow \infty$$

## CAPÍTULO V

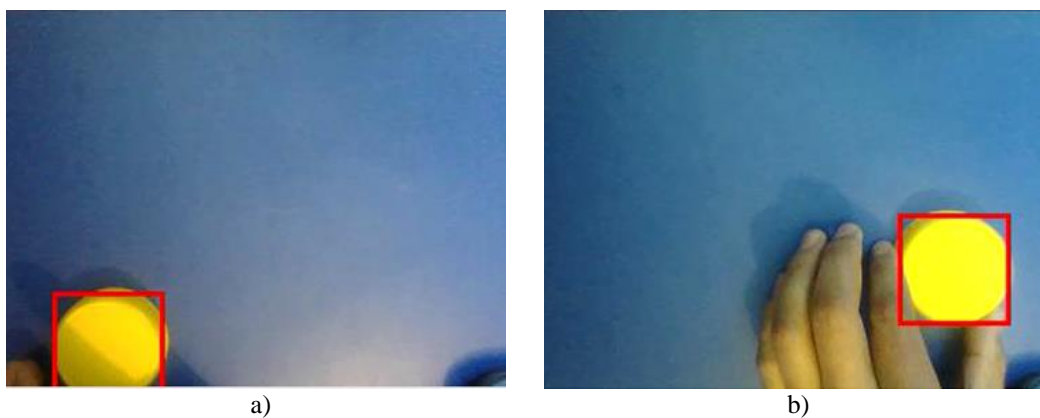
### 5. RESULTADOS

#### 5.1. Resultados de visión artificial

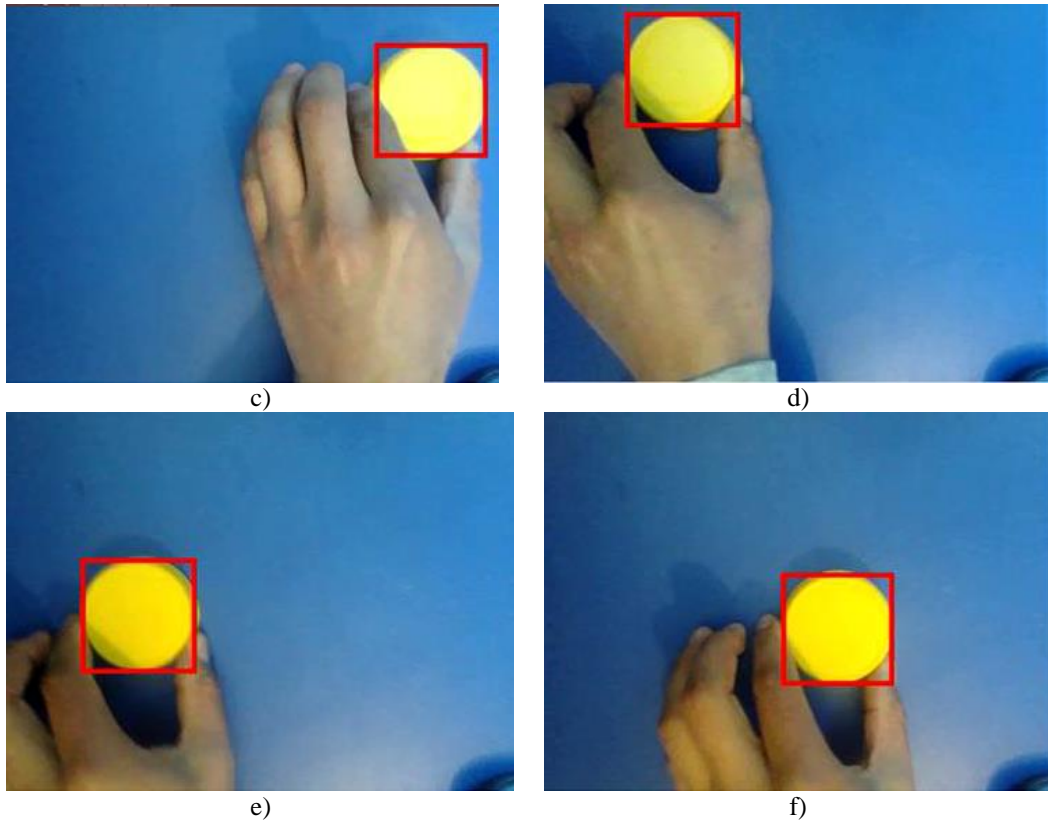
La composición de dos cámaras se implementa para generar la visión estéreo. Para llevar a cabo el objetivo principal, inicialmente se desarrolla programación para el seguimiento del objeto con una sola cámara y posteriormente se la fusiona con la información provista por la segunda cámara. Los resultados de la detección de objetos circulares (una sola cámara) y esféricos (visión estéreo) se presentan en esta sección.

##### 5.1.1. Resultados de seguimiento de objetos con una cámara

Previo al seguimiento de objetos con la composición de dos cámaras, la prueba de seguimiento con una sola cámara es implementada. Como se detalla en la sección visión y adquisición de imagen del Capítulo IV, las librerías de Matlab permiten ubicar el centro de una circunferencia encontrada en el plano de imagen. Posterior a la detección y la validación de una circunferencia, el desplazamiento del objetivo es almacenado con el fin de determinar su comportamiento en el tiempo y graficarlo en un plano de pixeles  $u, v$ . La Fig. 1-5 muestra la detección de objetos circulares discriminando el radio y el color de los objetos, con cual el programa retorna el valor de posición en pixeles del objeto en ambos ejes.

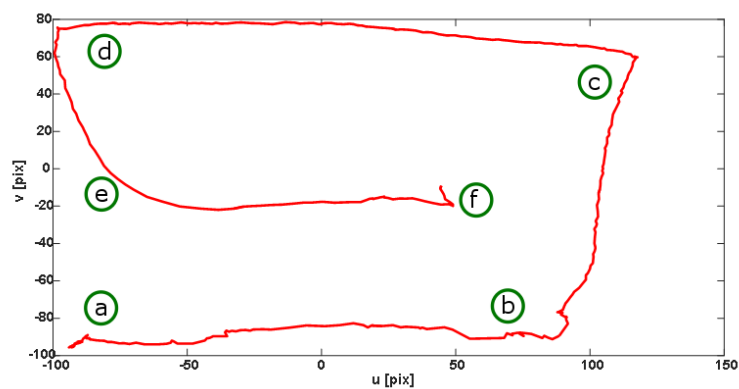






**Fig. 1-5** Detección del objeto circular con una cámara  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

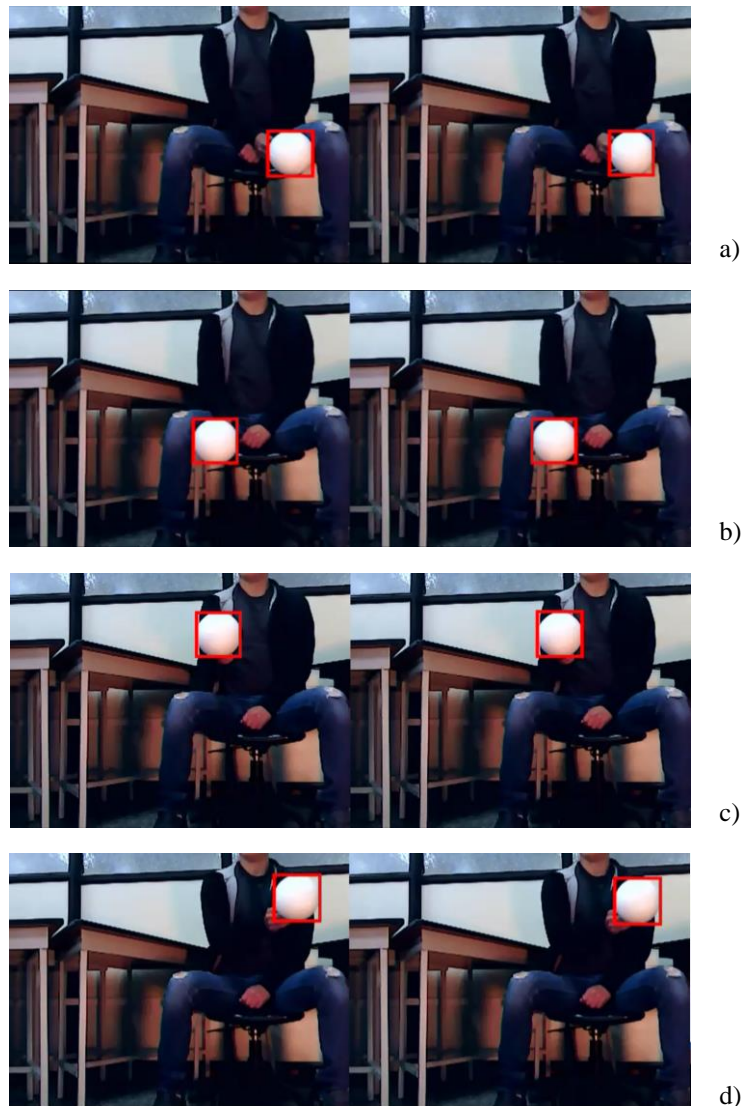
En el par de Fig. 1-5 (a) y (b), el movimiento del objeto es llevado en cabo desde la esquina inferior izquierda hacia la derecha. Posteriormente de derecha a izquierda en la parte superior, finalizando con el objeto en el centro de los ejes de coordenadas de imagen. El seguimiento del centro del objeto con visión artificial se muestra en la Fig. 2-5, donde (a) representa en punto de inicio y (f) el punto final.



**Fig. 2-5** Ploteo del desplazamiento del objeto detectado con una cámara  
 Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 5.1.2. Resultados de seguimiento de objetos con visión estéreo

La prueba de detección con una sola cámara es determinante para la fusión de ambas imágenes. Una vez probado satisfactoriamente el seguimiento del objeto con una imagen, el resultado de la prueba retorna un par de valores de la posición del centro de la circunferencia. Con una nueva cámara y dada la distancia existente entre ambas, otro par de valores correspondientes al centro de la circunferencia de la segunda cámara son provistos. El uso de las ecuaciones para calcular la triangulación permite obtener las posiciones reales del objeto en el espacio, permitiendo almacenar valores para posteriormente graficar su funcionamiento en función del tiempo. La Fig. 3-5 muestra una secuencia de capturas de los movimientos del objeto en el espacio, los cuales generan una trayectoria que se muestra en la Fig. 4-5.





e)



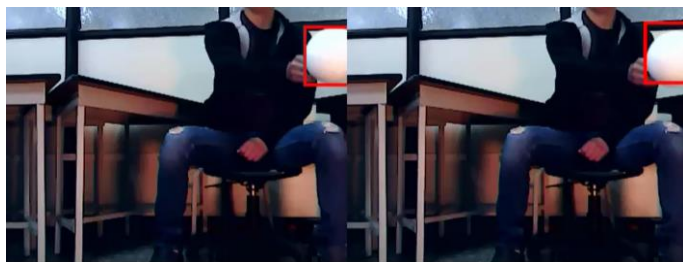
f)



g)

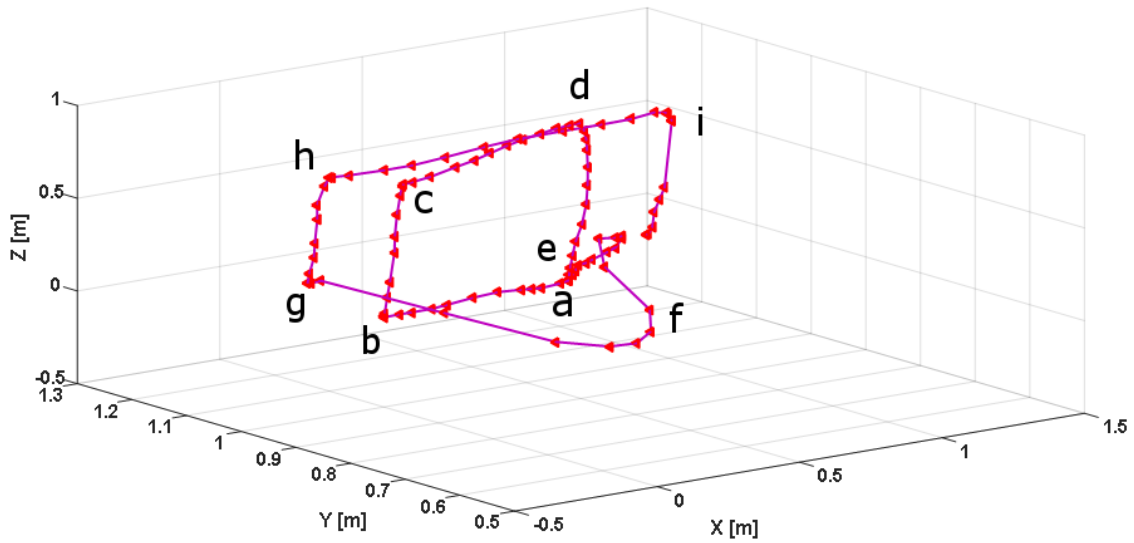


h)



i)

**Fig. 3-5** Detección del objeto circular con visión estéreo  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



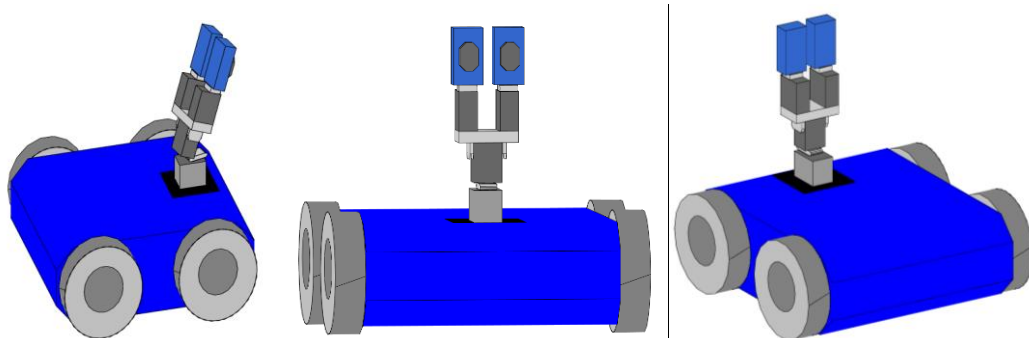
**Fig. 4-5** Representación gráfica del desplazamiento tridimensional del objeto detectado con visión estéreo

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

En ambas Fig. 3-5 y Fig. 4-5, una trayectoria tridimensional se llevó a cabo para evaluar el desempeño del sistema de reconocimiento. De las etapas (a) a la (e), la forma de un cuadrado es emulada con una profundidad de 1.10 metros, mientras que en la etapa (f), la variación de profundidad llega a 1 metro. Finalmente, de las etapas (g) a la (i), se replica la forma de un cuadrado pero con una profundidad de 1.2 metros.

## 5.2. Resultados del control del robot móvil y estructura articular

El control de seguimiento de trayectoria es simulado antes de su ejecución en el entorno real. Para esto, el diseño de un objeto tridimensional al que se le pueda modificar posiciones y desplazamiento es requerido. Matlab posee características de ploteo que permiten diseñar brevemente objetos con los cuales se puede interactuar en una simulación, mediante lo cual se propone el uso de un objeto simulado compuesto de dos partes: la base móvil y la articulación. En la Fig. 5-5 se presenta tres perspectivas de la base móvil unida a la estructura articular que permiten validar los algoritmos de control gráficamente.



**Fig. 5-5** Base móvil unida a la estructura articular simulada  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Los resultados de simulación se presentan en dos partes: i) considerando el punto de interés y considerando retroalimentación visual. A continuación, se presentan los resultados gráficos y el análisis de cada uno de éstos.

### 5.2.1. *Resultados de simulación y experimentación considerando el punto de interés*

La consideración del punto de interés es usada para validar la primera parte del control generado previo a la inclusión visual. Con esto, se valida el control cinemático para la estructura móvil unida a la estructura articular y se presenta la tendencia a cero de los errores. Los resultados de simulación considerando el punto de interés se basan en dos pruebas, el seguimiento de una trayectoria sinusoidal y la segunda con una trayectoria circular. Tomando en cuenta el escenario ideal que ofrece la simulación, los parámetros de control se muestran a continuación:

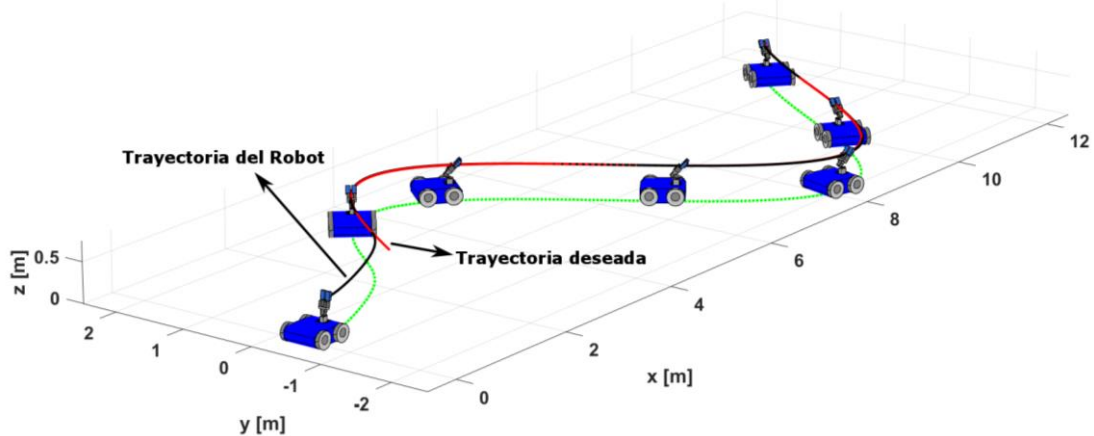
$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix}$$

De manera similar a las pruebas de simulación, los resultados de experimentación consideran dos trayectorias para validar la modelación matemática y los algoritmos de control. Dado que el entorno de pruebas ahora es real, ciertos parámetros ideales dados en la simulación cambian sustancialmente, obligando a adecuar los algoritmos de control para tener una mejor corrección de errores. Los parámetros de control tomados en cuenta para ambas experimentaciones son los que se muestran a continuación:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix}$$

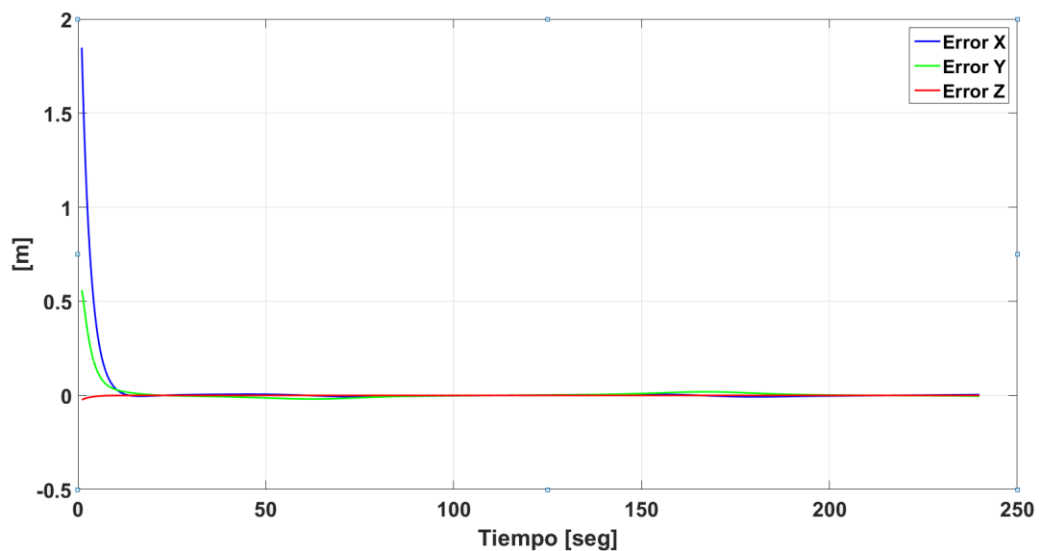
### 5.2.1.1. Prueba de simulación No. 1 considerando el punto de interés

La trayectoria de prueba 1 es una sinusoidal de 2 metros de longitud en el eje Y, una recta de 0.4 metros en el eje X y de altura constante de 0.45 metros. La Fig. 6-5 muestra el movimiento estroboscópico del robot en el seguimiento de la trayectoria programada.

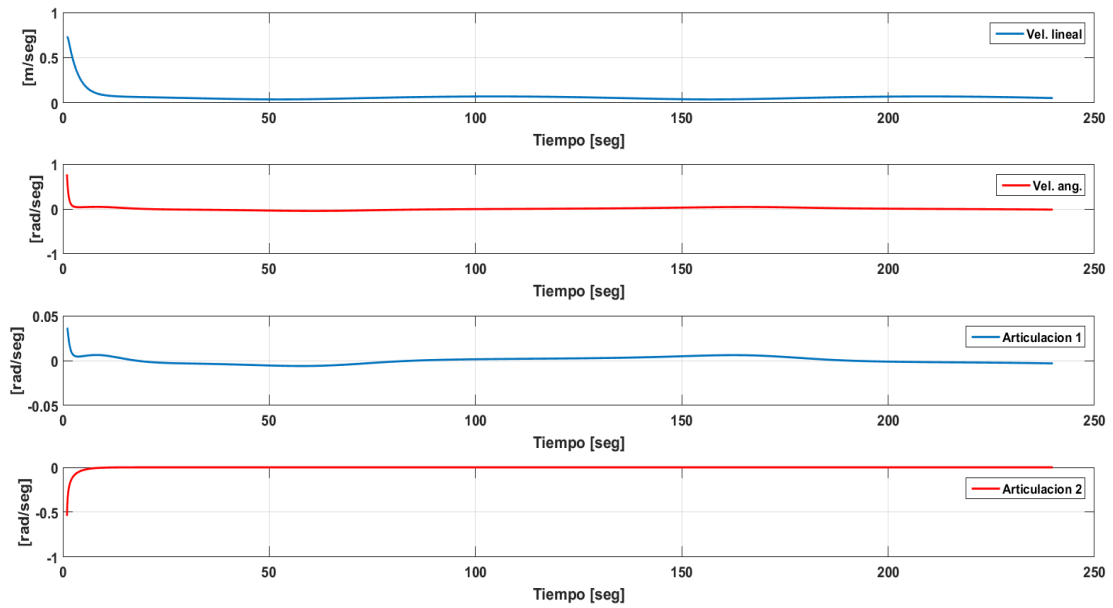


**Fig. 6-5** Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Los resultados de la simulación presentan la corrección de errores y las velocidades de control aplicadas a cada una de los actuadores, tanto de la base móvil como de la estructura articular. En la figura de la corrección de errores (Fig. 7-5) se determina la tendencia a cero del error, mientras que la variación de velocidad de cada motor se ilustra en la Fig. 8-5.



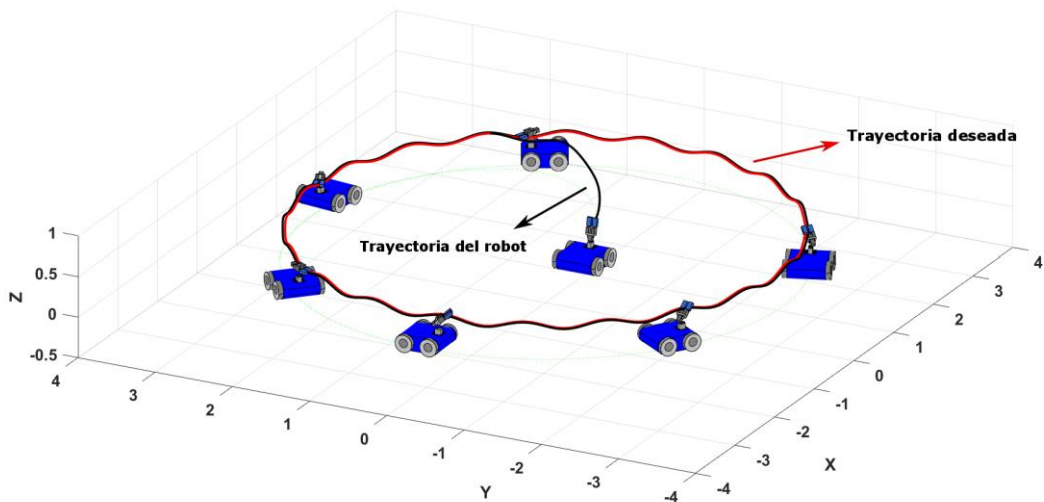
**Fig. 7-5** Errores de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 8-5** Velocidades de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

**5.2.1.2. Prueba de simulación No. 2 considerando el punto de interés**

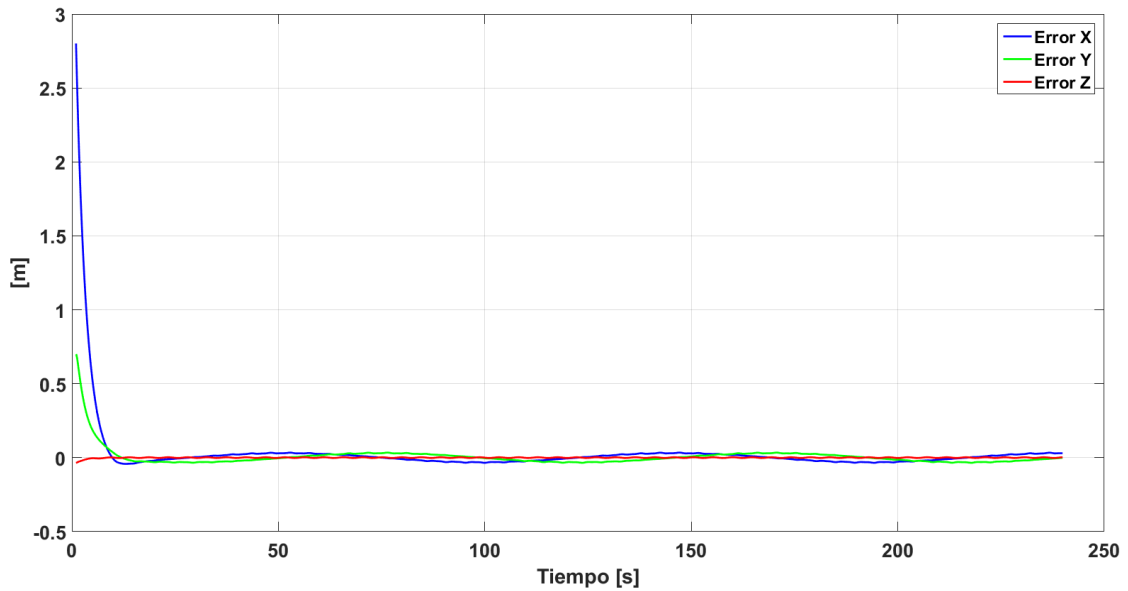
Para esta simulación, el arreglo de funciones en los ejes X – Y generan una circunferencia de radio de 3 metros, y en el eje Z una función sinusoidal de 0.04 metros de amplitud de oscilación a 2 Hz y altura fija de 0.4 metros (Fig. 9-5).



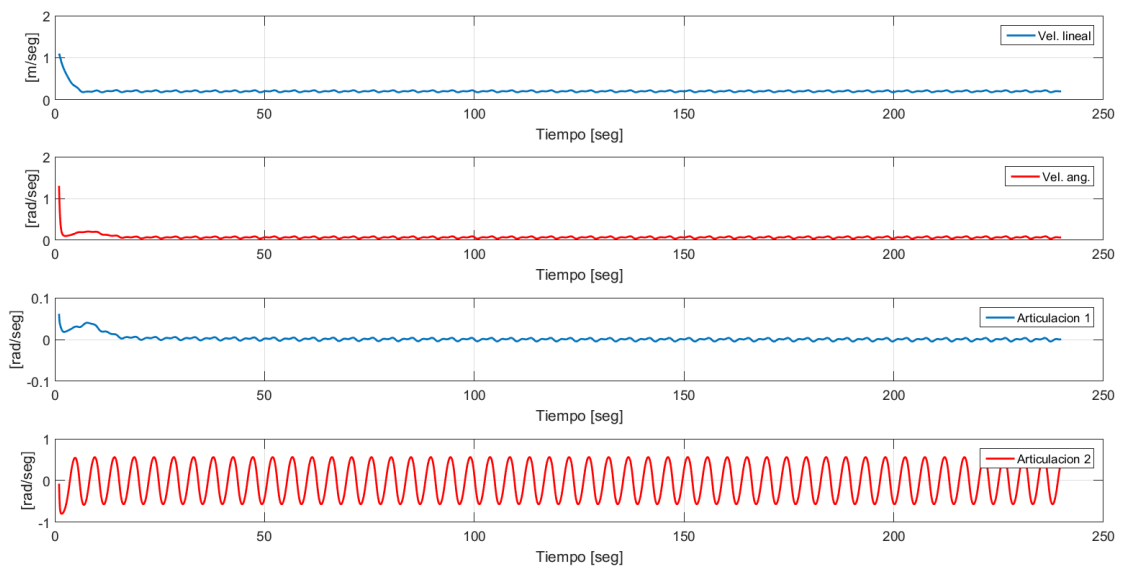
**Fig. 9-5** Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 2 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

La Fig. 10-5 muestra la tendencia a cero de los errores de control, mientras que la Fig. 11-5 presenta las acciones generadas por el controlador para mantener el seguimiento de la trayectoria. En la corrección de errores, la tendencia a cero del eje X es notoria en relación al resto de ejes, dadas las condiciones iniciales de posición del robot. Una vez el robot este ubicado en la

trayectoria deseada, las acciones de control para la base robótica y el primer grado de libertad de la articulación son relativamente constantes, mientras que para el segundo grado de libertad es variable debido al requerimiento de la función ingresada.



**Fig. 10-5** Errores de control - prueba de simulación 2 considerando el punto de interés  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



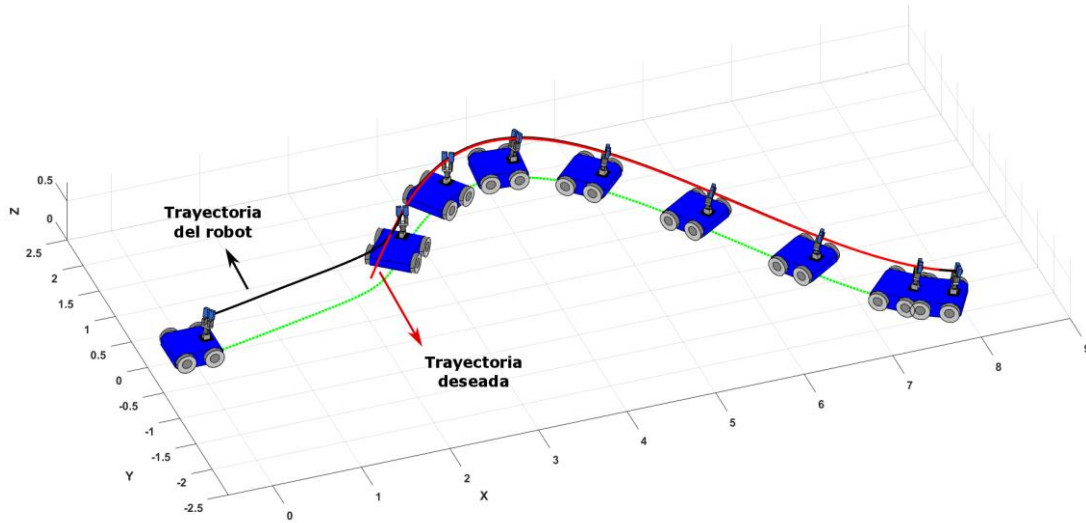
**Fig. 11-5** Velocidades de control - prueba de simulación 1 considerando el punto de interés  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 5.2.1.3. Experimentación 1 considerando el punto de interés

La primera experimentación tiene una altura fija de 0.5 metros, una sinusoidal en el eje X de 2 metros de radio y una longitud constante en el eje Y. La posición inicial del robot se encuentra en el origen de coordenadas, mientras que el primer punto de la trayectoria deseada se encuentra a

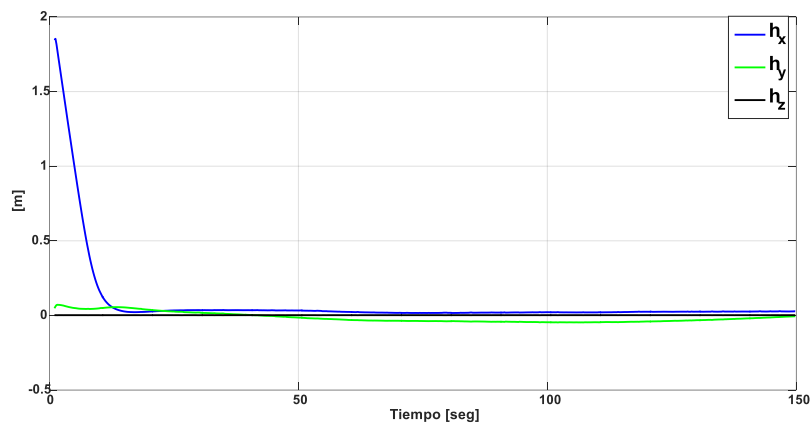


una distancia mayor de 2 metros. La Fig. 12-5 muestra el movimiento estroboscópico del robot ejecutando la prueba experimental 1, indicando la trayectoria real del robot y la trayectoria deseada.



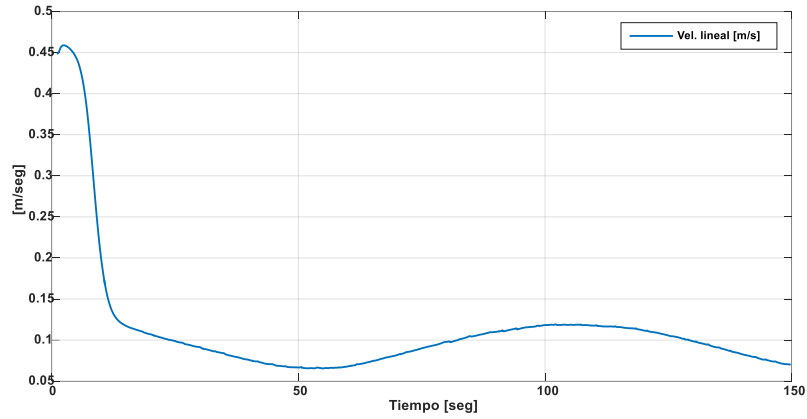
**Fig. 12-5** Movimiento estroboscópico - experimentación 1 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

La trayectoria deseada es alcanzada aproximadamente 20 segundos luego del inicio de la ejecución dado el análisis de errores de la Fig. 13-5. Para que dichos errores tiendan a cero, las acciones de control lineal (Fig. 14-5), angular (Fig. 15-5) y de las articulaciones (Fig. 16-5 y 17-5) son establecidas. Las acciones de control lineal y angular juegan el papel más importante en esta experimentación, mientras que las velocidades de control en las articulaciones son relativamente pequeñas dada la altura constante.



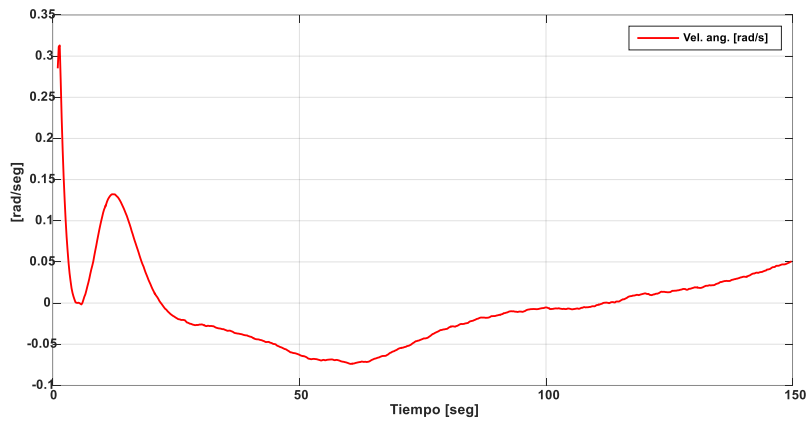
**Fig. 13-5** Errores de control – experimentación 1 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



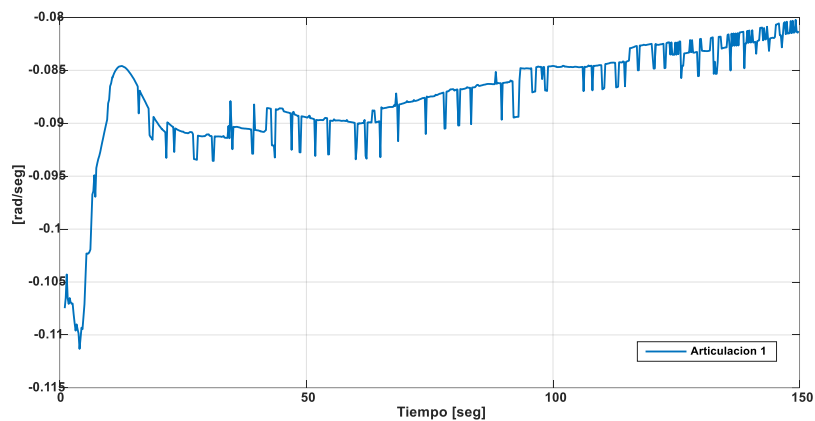
**Fig. 14-5** Velocidad de control lineal – experimentación 1 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



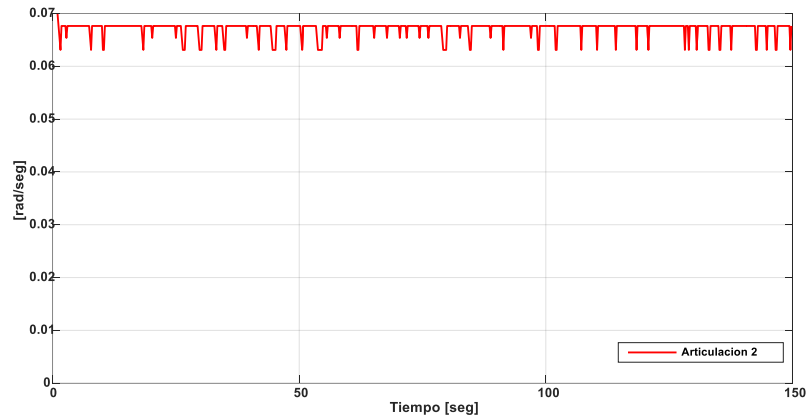
**Fig. 15-5** Velocidad de control angular – experimentación 1 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 16-5** Velocidad de control para la articulación 1 – experimentación 1 considerando el punto de interés

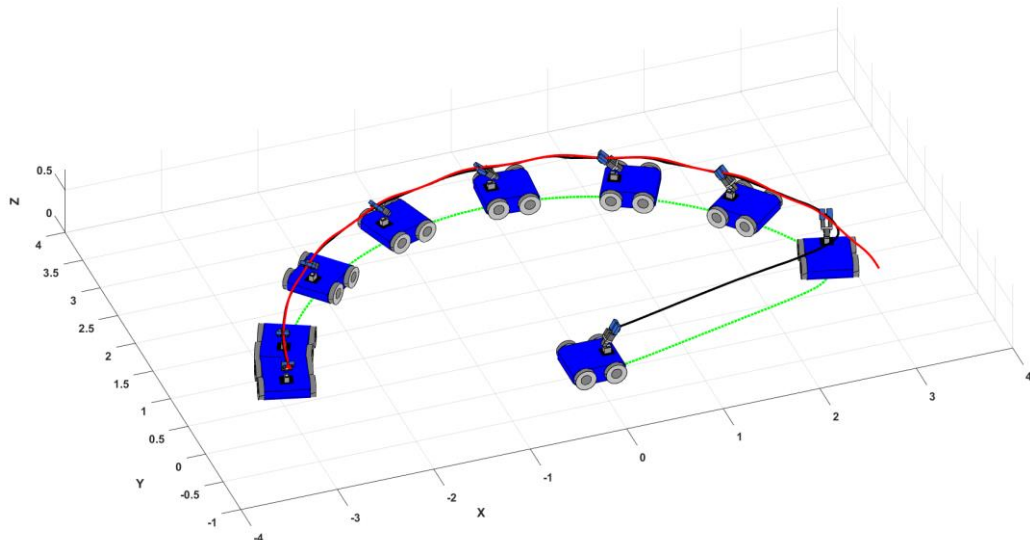
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 17-5** Velocidad de control para la articulación 2 – experimentación 1 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

#### 5.2.1.4. Experimentación 2 considerando el punto de interés

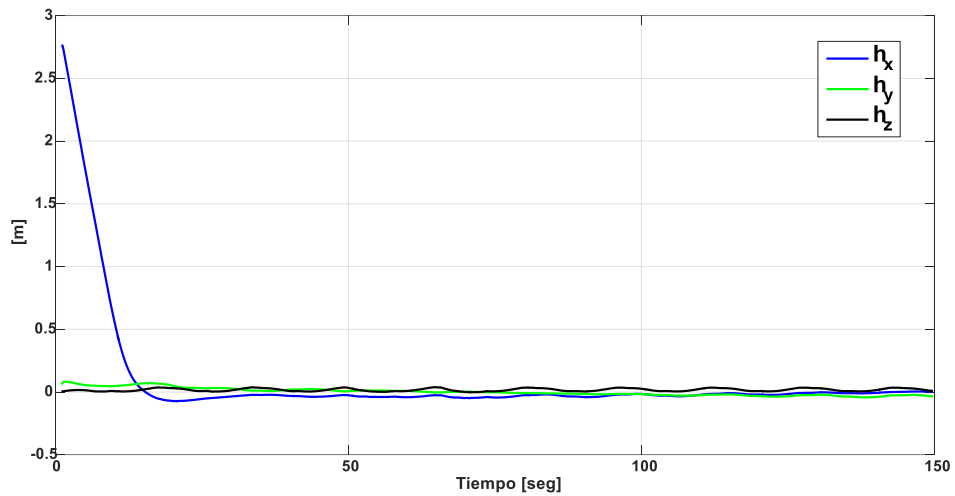
La prueba experimental 2 tiene una altura variable de 0.5 metros generada por una función sinusoidal más una altura constante de 0.05 metros (variaciones de 0.45 a 0.55 metros), mientras sigue una media circunferencia en los ejes X-Y con el centro en el origen de coordenadas. La posición inicial del punto de interés del robot se encuentra en la posición (0, 0, 0.5). La Fig. 18-5 muestra el movimiento estroboscópico del robot ejecutando la segunda prueba experimental, donde la línea de color rojo es la trayectoria deseada y la de color negro es la ejecutada por el robot.



**Fig. 18-5** Movimiento estroboscópico - experimentación 2 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

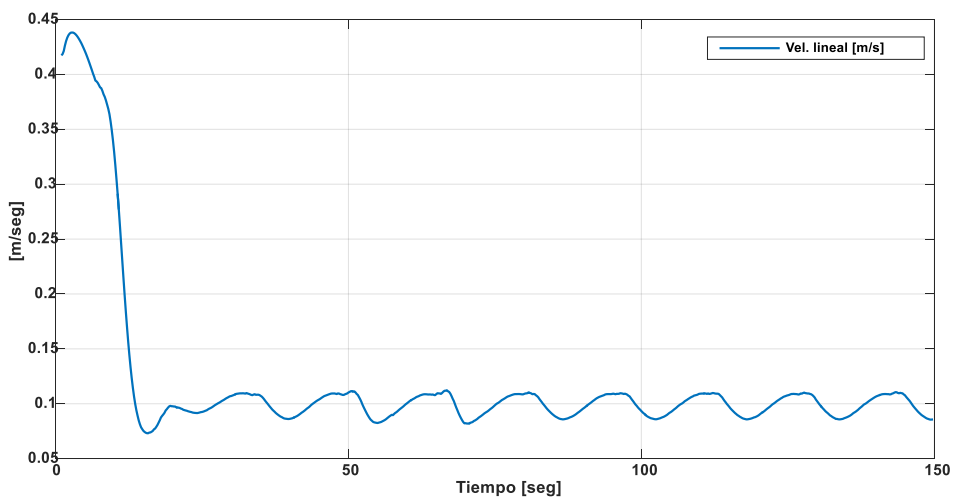
La tendencia a cero de los errores de control se presenta en la Fig. 19-5. Debido a la posición inicial del punto de interés del robot, la corrección en el componente X es más brusca en

comparación a los otros dos componente, la cual llega a un error menor a 0.2 metros en aproximadamente 20 segundos.

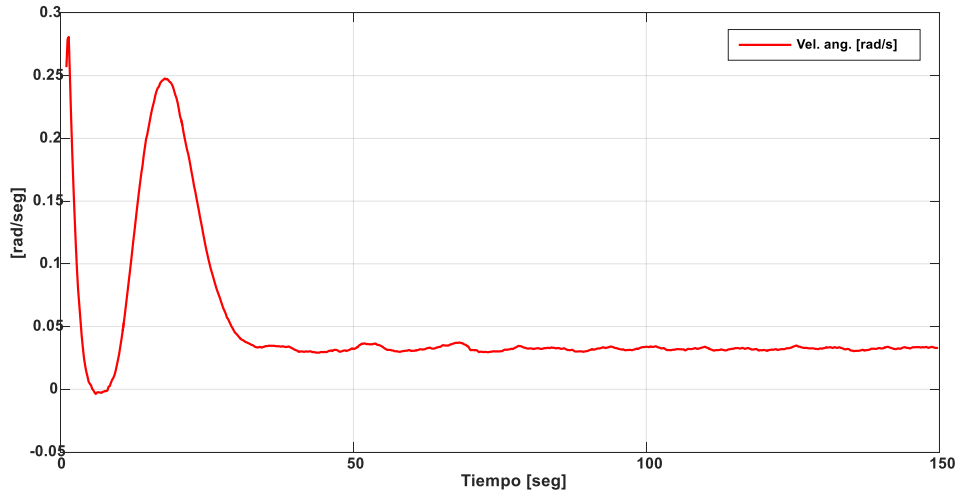


**Fig. 19-5** Errores de control – experimentación 2 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Todas las acciones de control intentan corregir los errores de una manera brusca los primeros 15 segundos de ejecución, sin embargo, con excepción de la velocidad de control para la articulación 2, todas se estabilizan posterior a los 30 segundos (Fig. 20-5. 21-5 y 22-5). La acción de control para la articulación 2 se mantiene oscilando debido a los requerimientos de la función de entrada (Fig. 23-5).

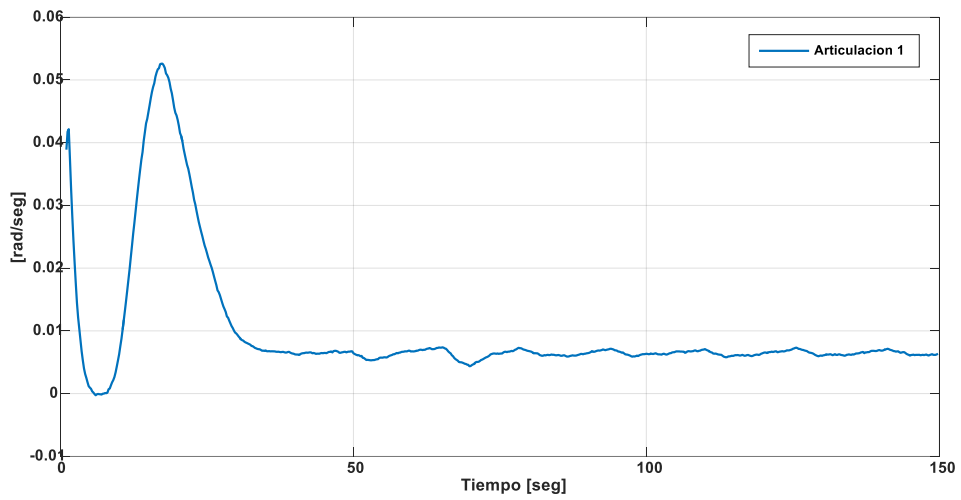


**Fig. 20-5** Velocidad de control lineal – experimentación 2 considerando el punto de interés  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



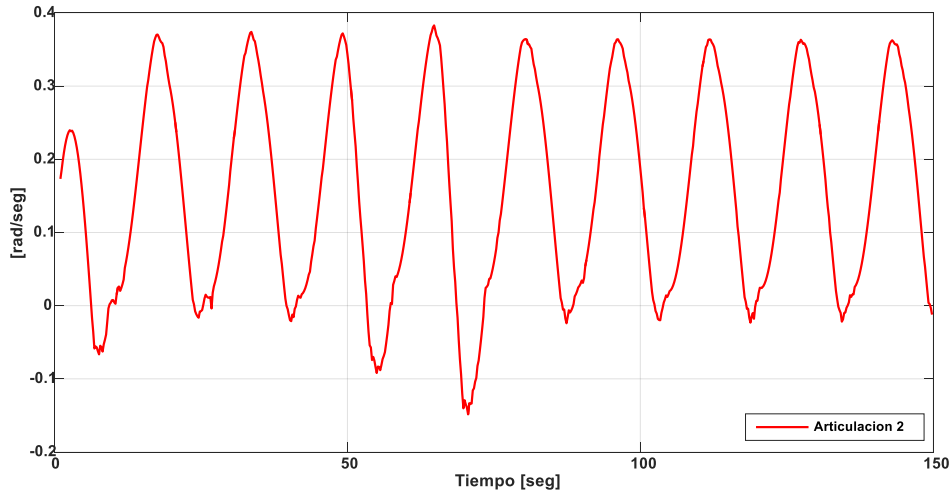
**Fig. 21-5** Velocidad de control angular – experimentación 2 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 22-5** Velocidad de control para la articulación 1 – experimentación 2 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 23-5** Velocidad de control para la articulación 2 – experimentación 2 considerando el punto de interés

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 5.2.2. *Resultados de simulación y experimentación considerando el seguimiento de objetos mediante realimentación visual*

A diferencia de la consideración del punto de interés, el seguimiento de objetos con retroalimentación visual incluye la combinación de las dos cámaras para cerrar el lazo de control. Para la simulación, un objeto esférico principal es creado para generar la trayectoria deseada que el robot seguirá y uno secundario para mejorar la distinción de profundidad. Con esto, se valida el control cinemático para la estructura móvil unida a la estructura articular y se presenta la tendencia a cero de los errores. Para los resultados de la simulación considerando la retroalimentación visual se presentan dos pruebas, la primera considerando el seguimiento de una trayectoria sinusoidal y la segunda con una trayectoria circular. Tomando en cuenta el escenario ideal dado por la simulación, los parámetros de control se muestran a continuación:

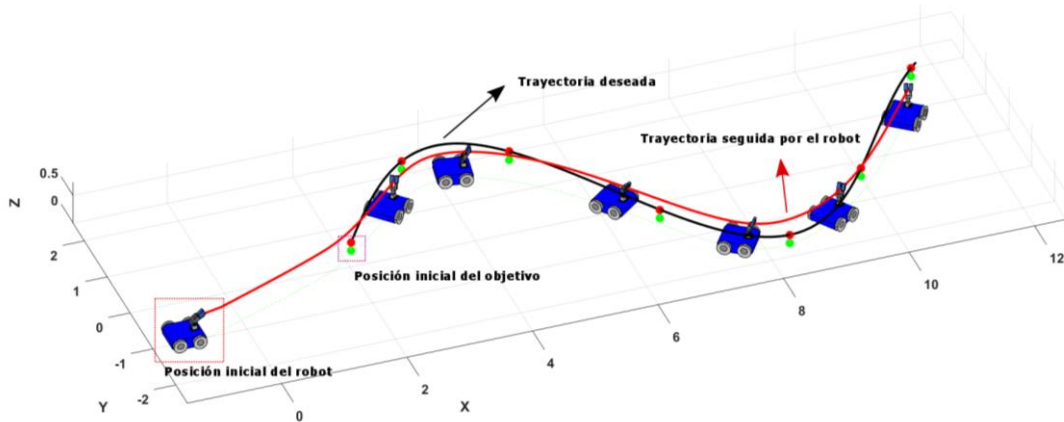
$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix}$$

Los resultados de la simulación y la experimentación considerando el punto de interés puden inconvenientes generados por la estructura del robot, mientras que la simulación considerando realimentación visual validan los modelos matemáticos y los controladores implementados. Adicional a la simulación, esta sección valida el controlador propuesto en un ambiente real mediante 2 experimentaciones, la primera variando el objetivo de seguimiento en el eje Y y la segunda sobre los ejes Y – Z. Los parámetros para la experimentación en un ambiente real considerando la retroalimentación visual son los siguientes:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix}$$

### 5.2.2.1. Prueba de simulación No. 1 considerando realimentación visual

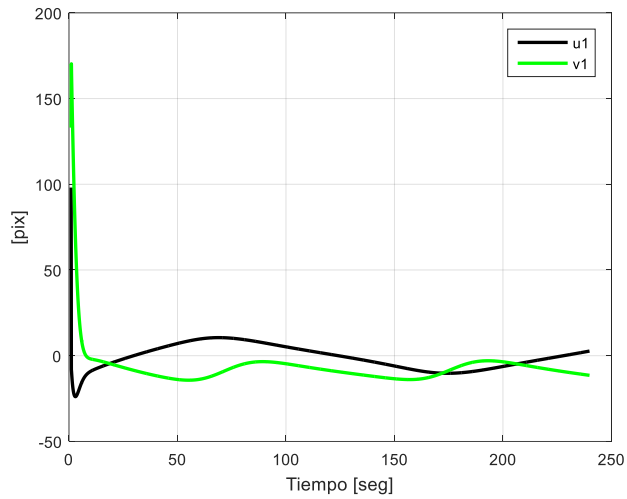
La trayectoria de prueba 1 es una sinusoidal de 2 metros de longitud en el eje Y, una recta de 0.4 metros en el eje X y de altura constante de 0.45 metros. La Fig. 24-5 presenta el movimiento estroboscópico del robot para el seguimiento de dicho objeto, notando la posición inicial del robot y la del objeto y la respuesta del controlador para mantener el robot dentro de la trayectoria deseada.



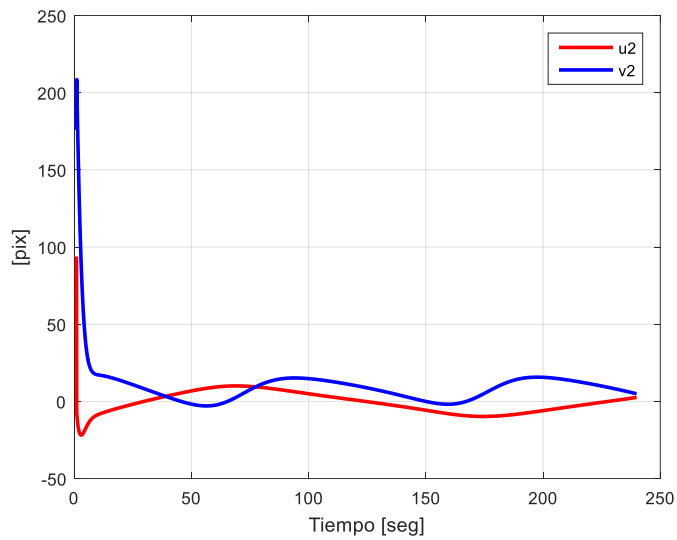
**Fig. 24-5** Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 1 considerando realimentación visual

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Las figuras resultantes por la simulación presentan 3 resultados, el error de posición en el plano de imagen del punto1, el error de posición en el plano de imagen del punto2, las acciones de control generadas y el desplazamiento del objeto. La Fig. 25-5 presenta la tendencia a cero de los errores de posición en el plano de píxeles  $u-v$  del primer objeto, mientras que la Fig. 26-5 muestra la tendencia de errores del segundo objeto simulado. Las acciones de control necesarias para mantener el robot dentro de la trayectoria deseada se presentan en la Fig. 27-5, incluyendo la velocidad lineal y angular para la parte móvil y las velocidades de control de ambas articulaciones. Finalmente, la Fig. 28-5 muestra el desplazamiento del objeto en el plano de imagen.

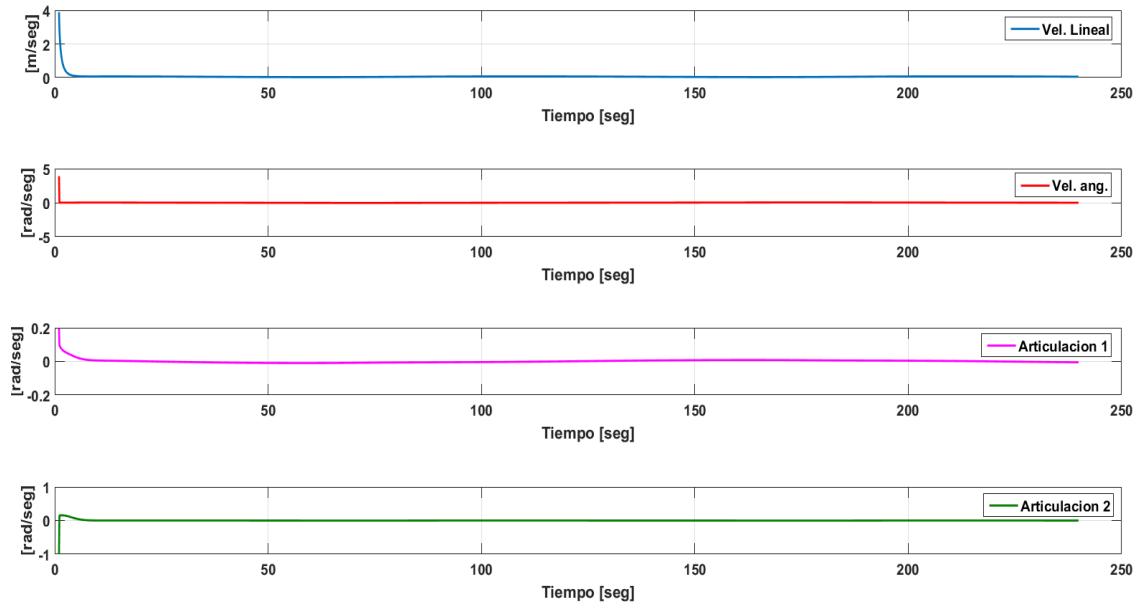


**Fig. 25-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual.  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

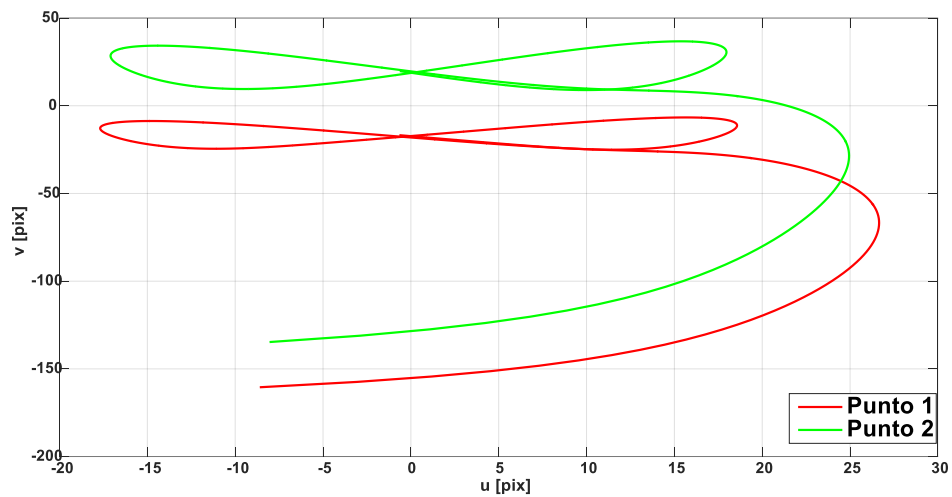


**Fig. 26-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis





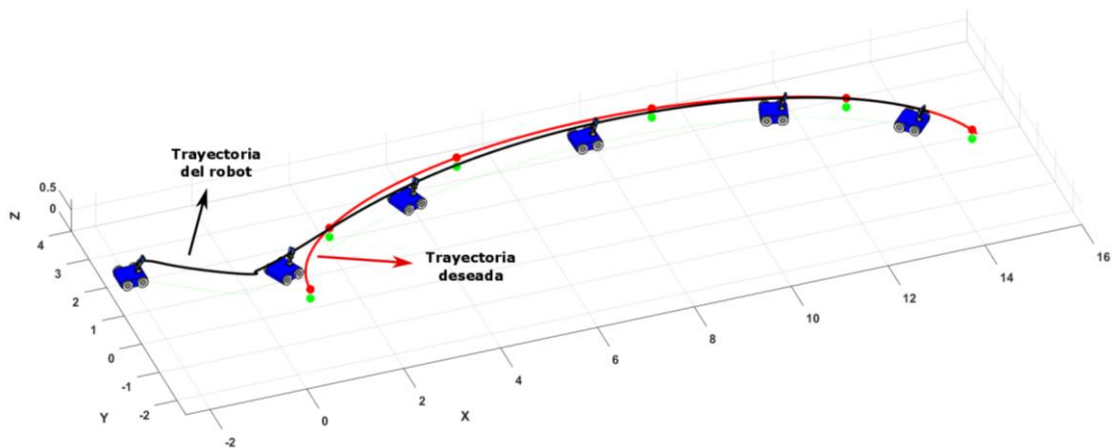
**Fig. 27-5** Velocidades de control - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 28-5** Desplazamiento del objeto en el plano de imagen - prueba de simulación 1 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

### 5.2.2.2. Prueba de simulación No. 2 considerando realimentación visual

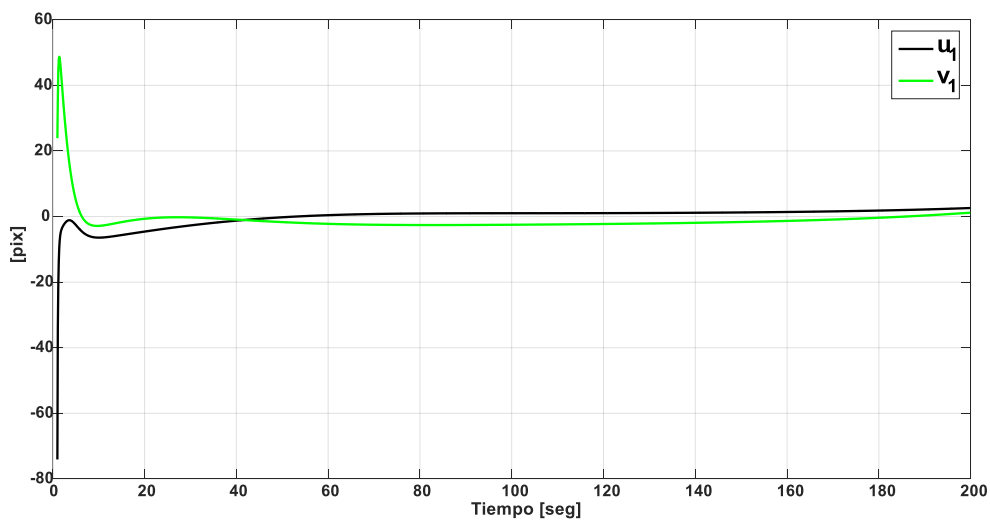
La segunda trayectoria de prueba es una elipse de 3 metros de radio en el eje Y, 7 metros de radio en el eje X y de altura constante de 0.45 metros. La Fig. 29-5 presenta el movimiento estroboscópico del robot para el seguimiento de la trayectoria deseada marcada por el objeto, donde la posición inicial es (-2, 2, 0.45).



**Fig. 29-5** Movimiento estroboscópico - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual

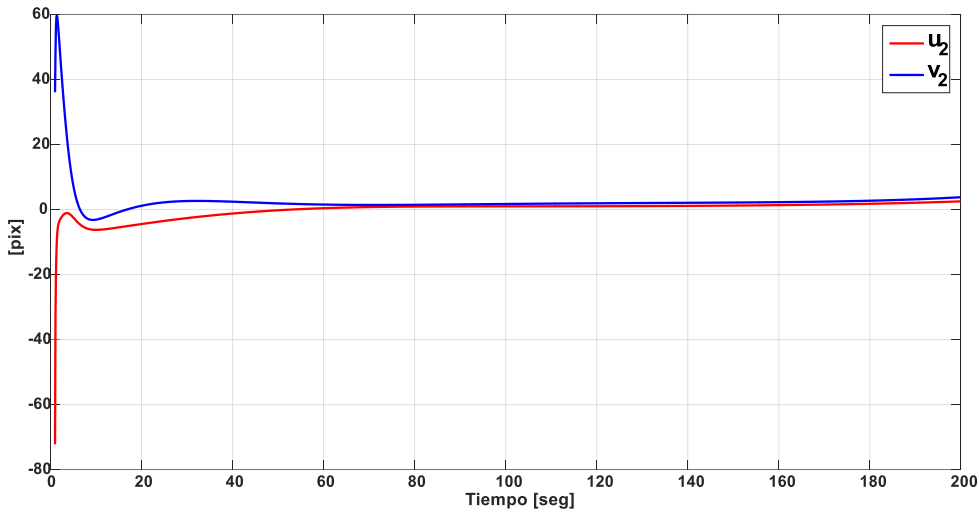
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

La corrección de errores en el plano de imagen de ambos puntos se muestra en las Fig. 30-5 y 31-5, en ambos de los casos obteniendo un error que tiende a cero luego de los 40 segundos. Las velocidades de control para esta prueba de simulación se estabilizan aproximadamente a los 10 segundos, como se muestra en la Fig. 32-5.

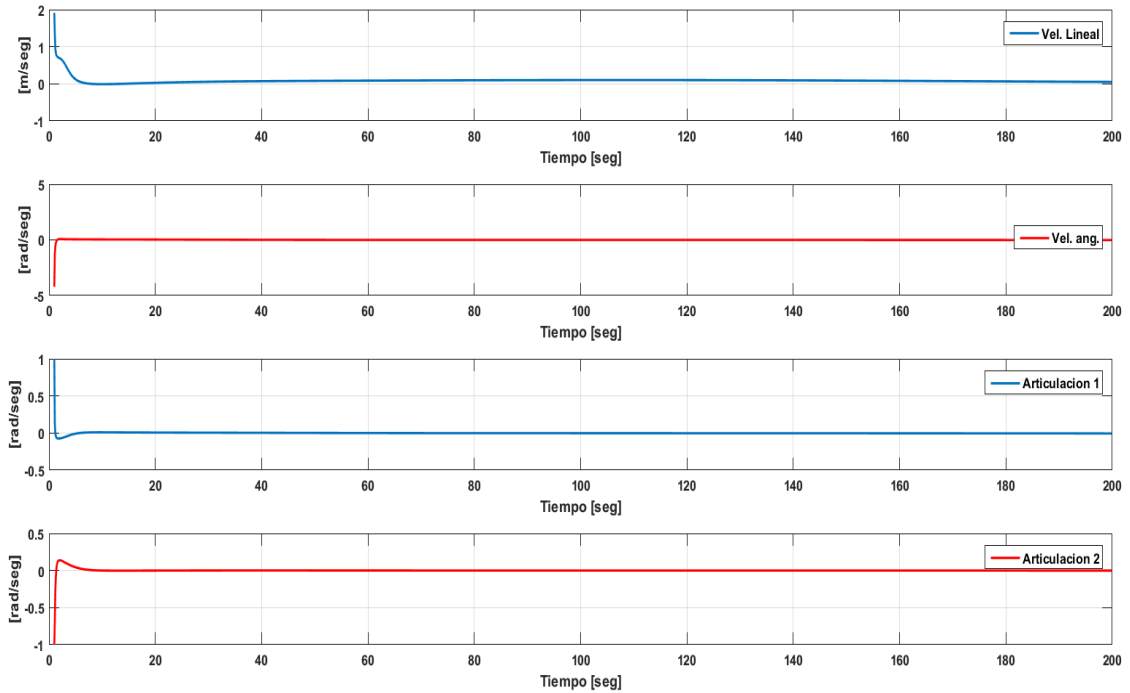


**Fig. 30-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

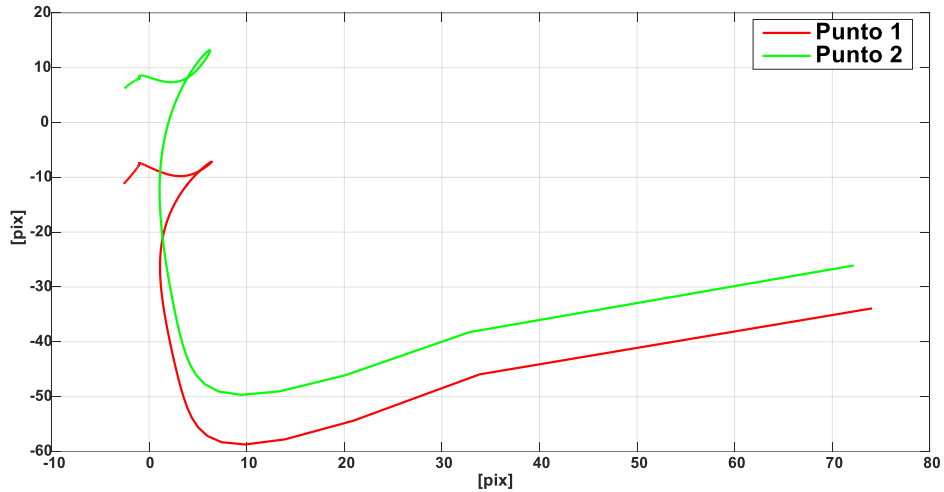


**Fig. 31-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 32-5** Velocidades de control - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

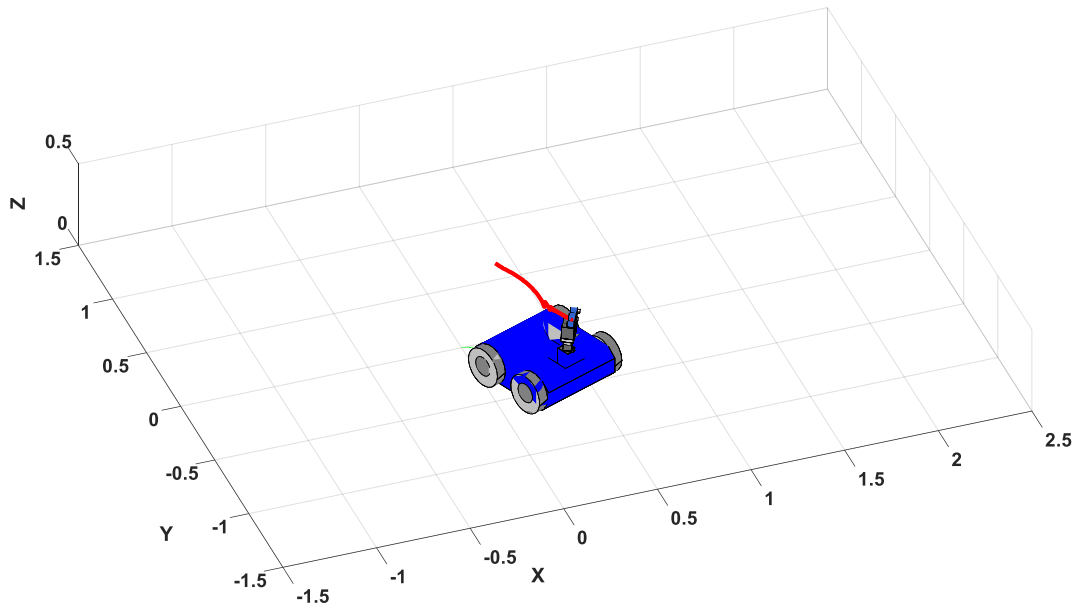
Finalmente, la simulación presenta como resultado el movimiento de los dos puntos en el plano de imagen, como se muestra en la Fig. 33-5. Ambos puntos son relativamente similares pero con una translación debida a la variación en la posición de los dos objetos.



**Fig. 33-5** Desplazamiento del objeto en el plano de imagen - prueba de simulación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

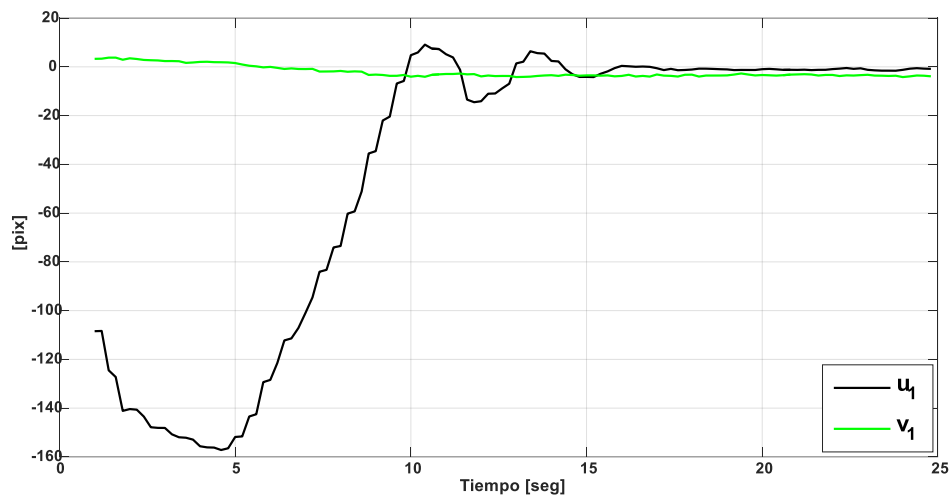
### 5.2.2.3. *Experimentación 1 considerando la realimentación visual*

La condición para que la primera prueba experimental concluya de la manera esperada es que el centro del objeto seguido se posicione en un punto deseado del plano de imagen. Para la ejecución de esta experimentación (Fig. 34-5), el objeto se mantiene en una posición estática y el robot debe adecuar sus posiciones para que el centro de la circunferencia alcance la posición esperada en el plano de imagen. La posición inicial del punto de interés sobre el cual se ubican las cámaras se encuentran en el eje de coordenadas, el ángulo del primer grado de libertad son  $-3.74$  grados y el ángulo del grado de libertad es  $87.44$  grados. Las coordenadas deseadas en el plano de imagen son para el primer punto=  $(0, 25)$  pix y para el segundo punto  $(0, 65)$  pix.

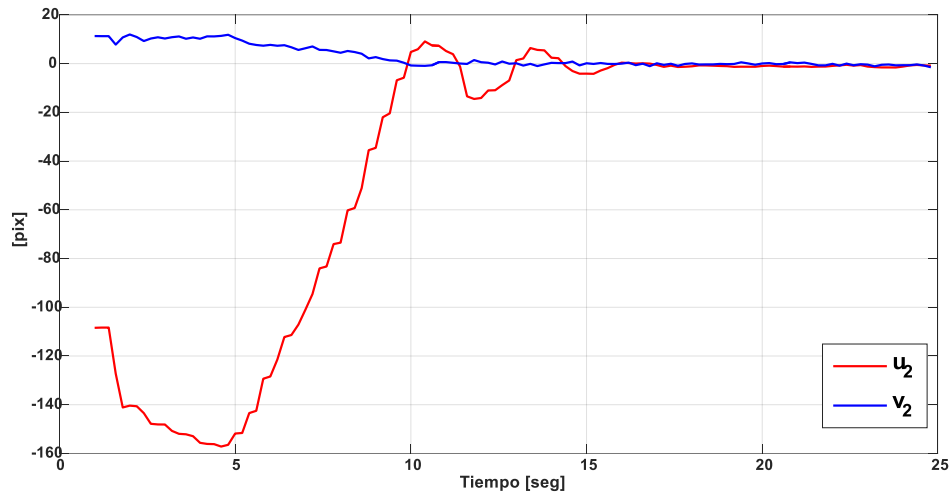


**Fig. 34-5** Movimiento estroboscópico - experimentación 1 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Los errores de control generados desde el inicio de la ejecución hasta alcanzar la posición deseada toman aproximadamente 15 segundos, siendo el valor en el eje  $v$  el que presenta mayor error. Los resultados de la corrección de errores se presentan en las Fig. 35-5 y Fig. 36-5.

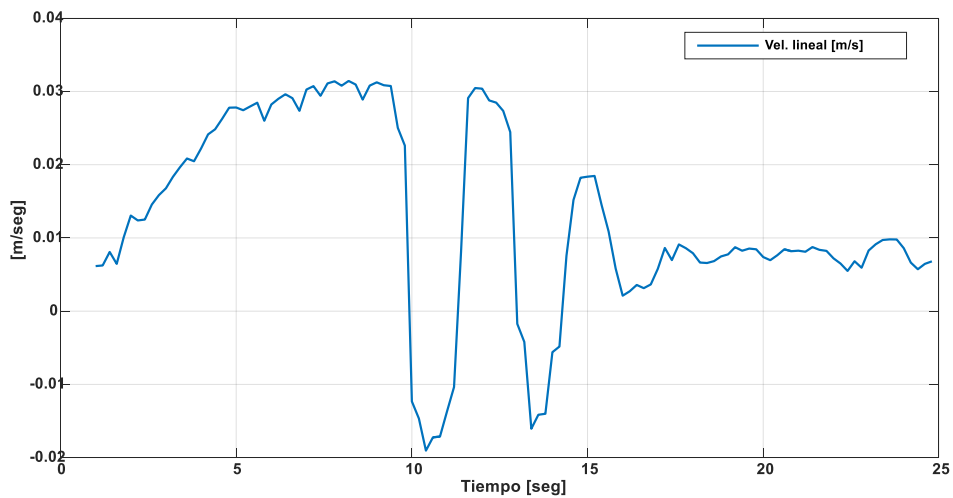


**Fig. 35-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 – experimentación 1 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

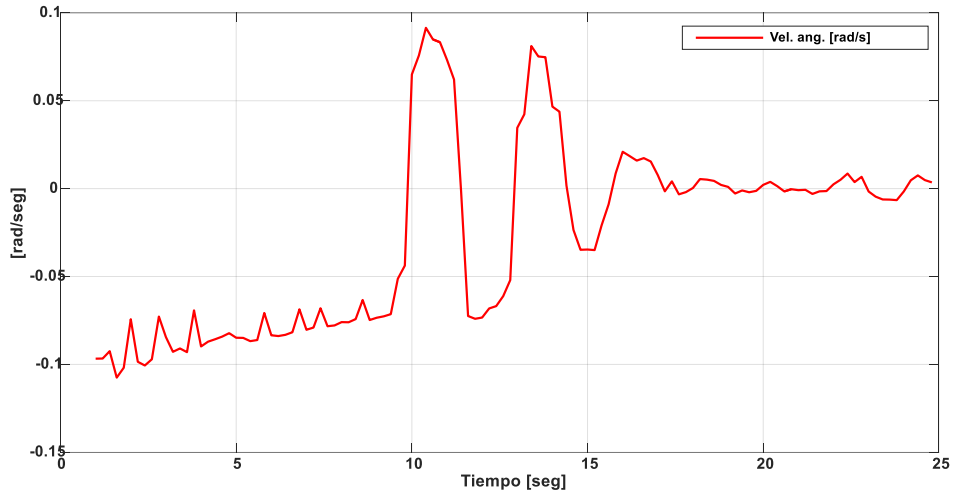


**Fig. 36-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 – experimentación 1 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

La velocidad lineal y la angular aplicada al robot sufren diversos cambios hasta alcanzar el objetivo deseado. Sin embargo, ambas velocidades se estabilizan luego de 15 segundos, cuyos resultados se presentan en la Fig. 37-5 y la Fig. 38-5.



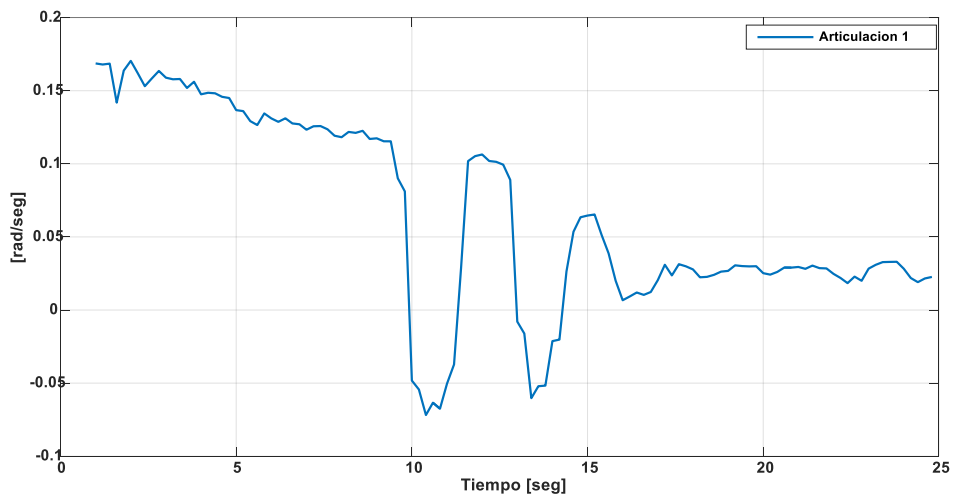
**Fig. 37-5** Velocidad de control lineal- experimentación 1 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 38-5** Velocidad de control angular - experimentación 1 considerando realimentación visual

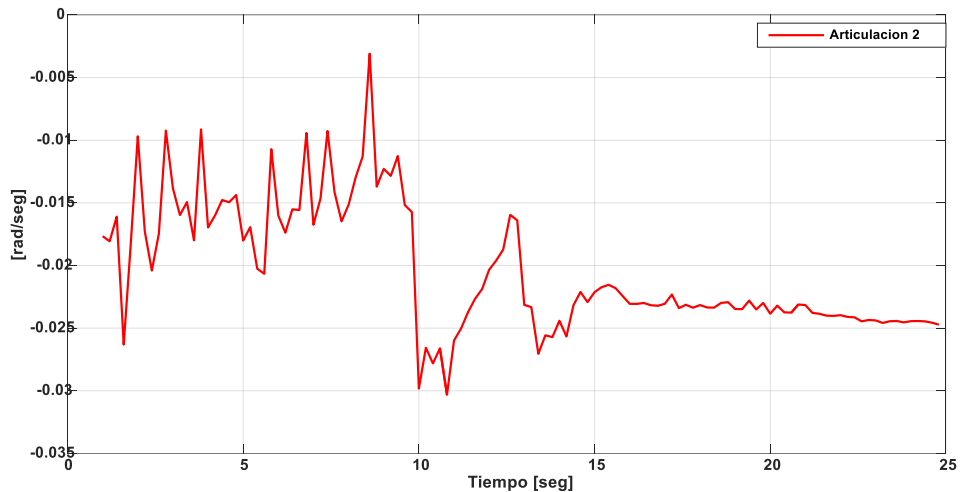
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Las velocidades de control para la articulación 1 (Fig. 39-5) y 2 (Fig. 40-5) difieren en su comportamiento dadas las posiciones iniciales. Similar a las velocidades de control lineal y angular, las velocidades de control para ambas grados de libertad se estabilizan a los 15 segundos luego de iniciada la ejecución, sin embargo, las velocidades para corregir el error son superiores para la primera articulación que para la segunda.



**Fig. 39-5** Velocidad de control para la articulación 1 - experimentación 1 considerando realimentación visual

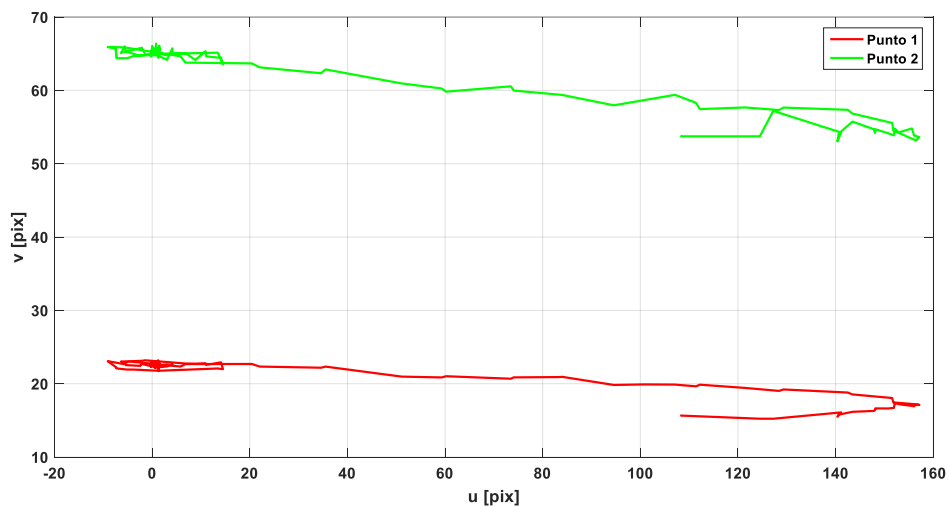
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 40-5** Velocidad de control para la articulación 2 - experimentación 1 considerando realimentación visual

**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

Finalmente, el desplazamiento del objeto en el plano de imagen hasta alcanzar la posición en píxeles deseada se muestra en la Fig. 41-5, en la cual se observa la posición inicial del punto 1 en (110, 15) y su corrección a (0, 20) al final de la ejecución con diversos intentos para encerrar el error.



**Fig. 41-5** Desplazamiento del objeto en el plano de imagen – experimentación 1 considerando realimentación visual

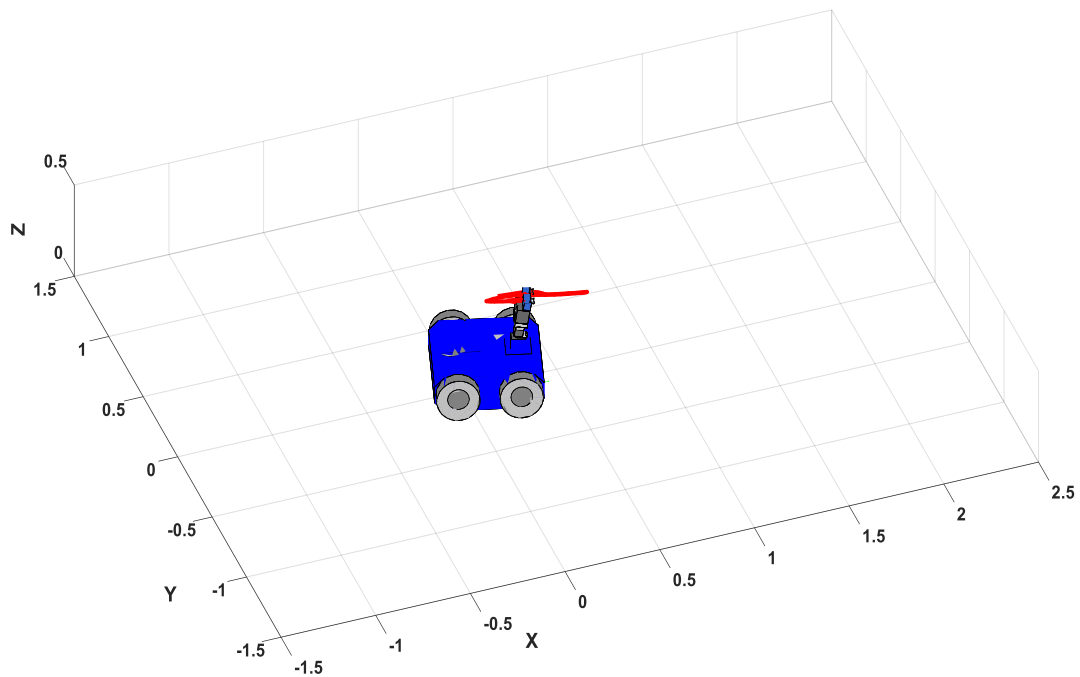
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

#### 5.2.2.4. *Experimentación 2 considerando realimentación visual*

Es con objeto móvil, solo mantiene en el punto deseado en el plano de imagen cuando el objeto permanece en movimiento.

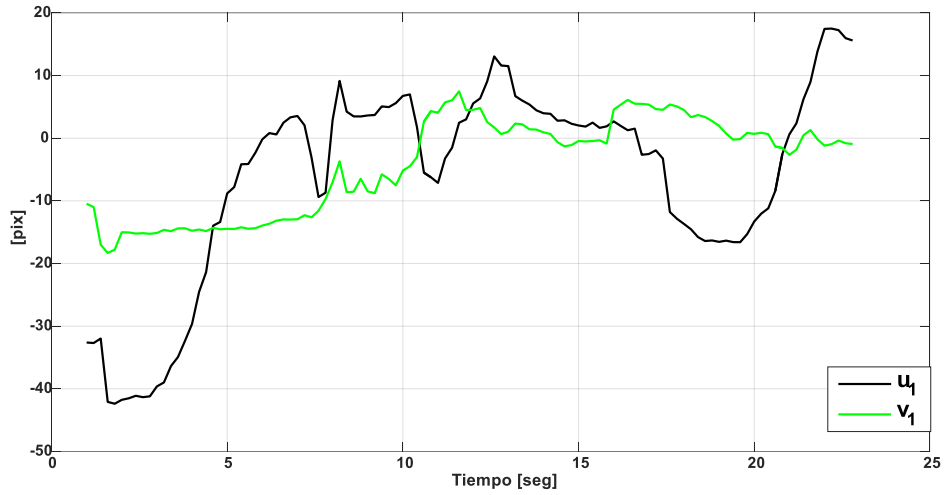


La segunda experimentación difiere de la primera por el movimiento del objeto en seguimiento. Teniendo al robot en una posición inicial conocida, la posición deseada es definida en el plano de imagen para mantener el centro de la circunferencia en ésta y modificar las posiciones del mecanismo. En el espacio tridimensional, una esfera modifica su posición en los tres ejes, todos relacionados con la posición en el plano de imagen. El movimiento estroboscópico de robot para ejecutar la experimentación 2 se muestra en la Fig. 42-5.

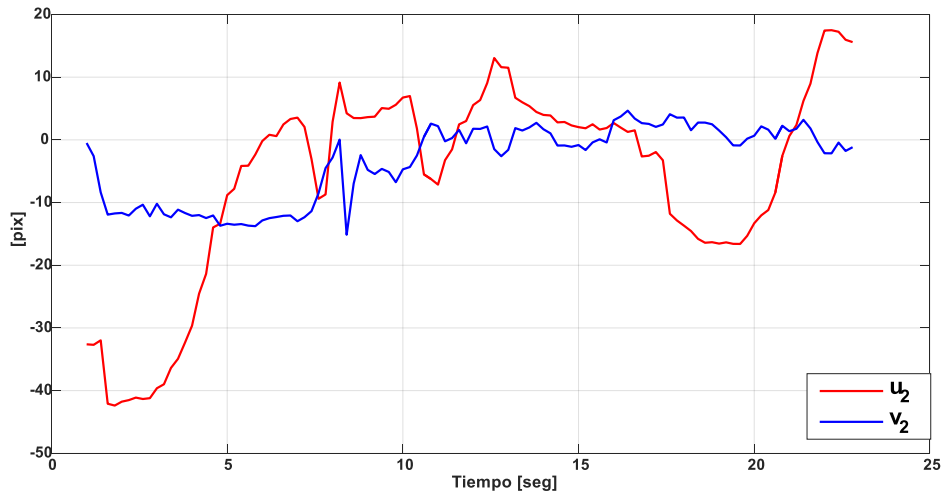


**Fig. 42-5** Movimiento estroboscópico - experimentación 2 considerando realimentación visual  
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacís

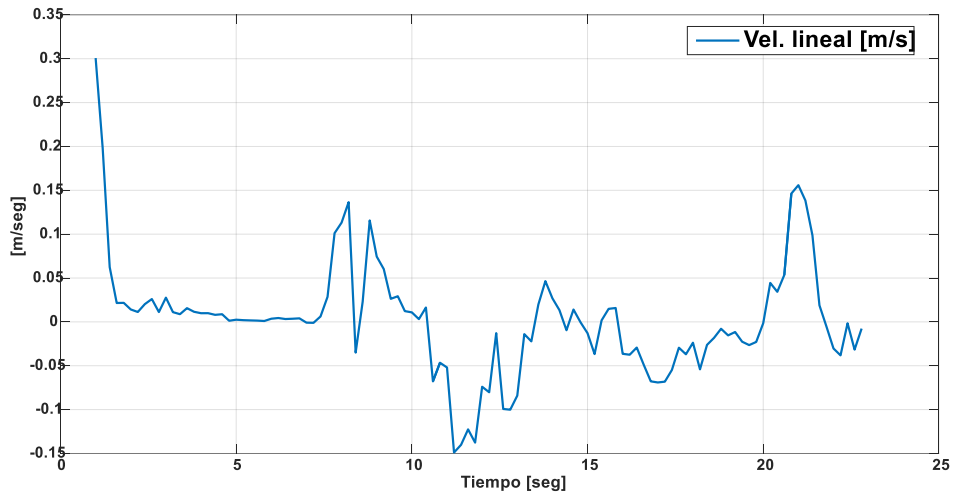
Los errores de posición mostrados en la Fig. 43-5 y Fig. 44-5 no sugieren una tendencia a cero de los errores luego de una posición estimada a diferencia del resto de simulaciones y experimentos. La razón por la cual no se distingue una estabilidad en cero de los errores de control se debe a que el objeto en seguimiento modifica su posición en todo el tiempo de la experimentación. Sin embargo, una tendencia a cero de los errores cada cierto periodo es mostrado en las figuras, lo cual sugiere el desempeño esperado por parte del robot. De igual manera que la estabilidad de los errores sobre cero, las acciones de control no consiguen mantenerse sobre un valor fijo dados los cambios repentinos en la posición del objeto. Las acciones de control para la velocidad lineal se muestran en la Fig. 45-5, para la velocidad angular en la Fig. 46-5 y para las velocidades de las articulaciones 1 y 2 en las Fig. 47-5 y Fig. 48-5, respectivamente.



**Fig. 43-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 1 – experimentación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis

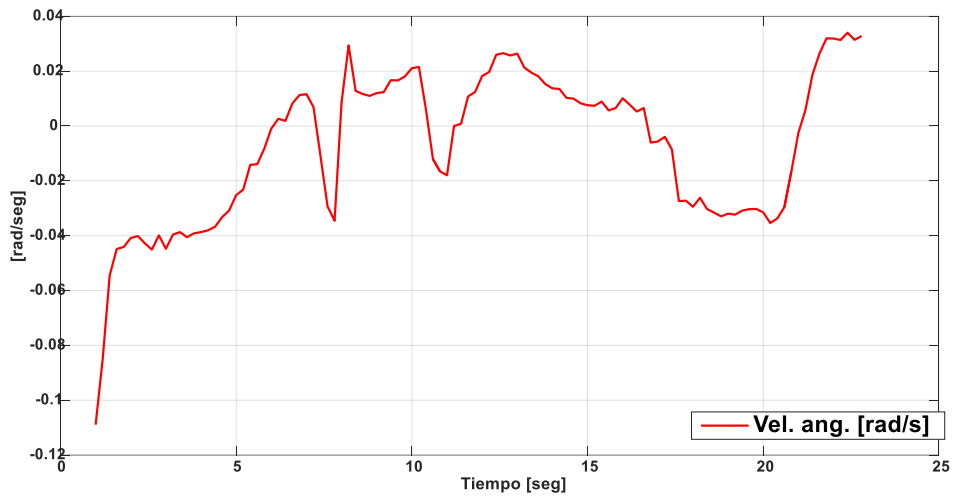


**Fig. 44-5** Errores de posición en el plano de imagen del punto 2 – experimentación 2 considerando realimentación visual  
**Realizado por:** Marlon Antonio Santamaría Villacis



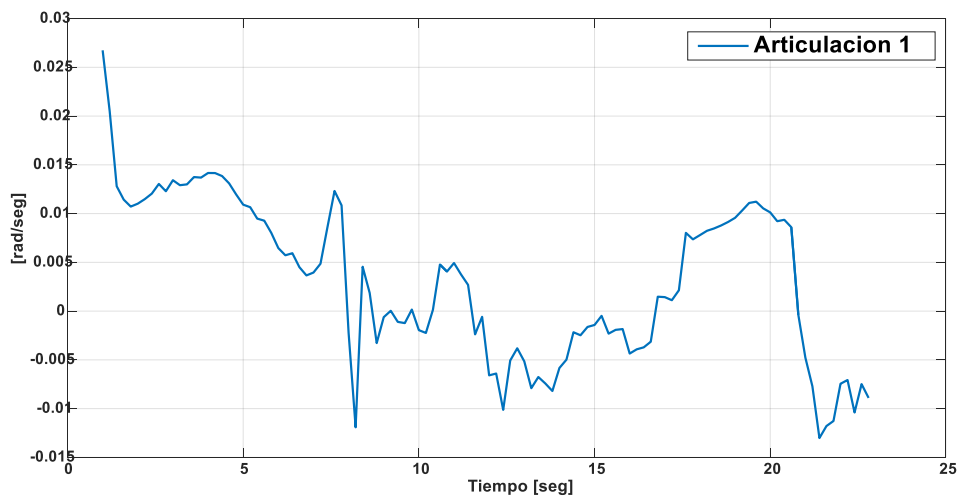
**Fig. 45-5** Velocidad de control lineal- experimentación 2 considerando realimentación visual

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



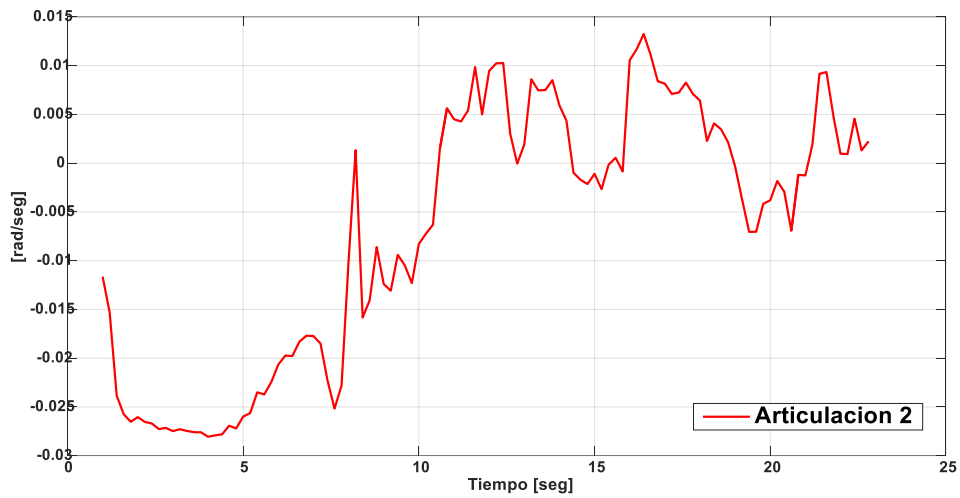
**Fig. 46-5** Velocidad de control angular - experimentación 2 considerando realimentación visual

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 47-5** Velocidad de control para la articulación 1 - experimentación 2 considerando realimentación visual

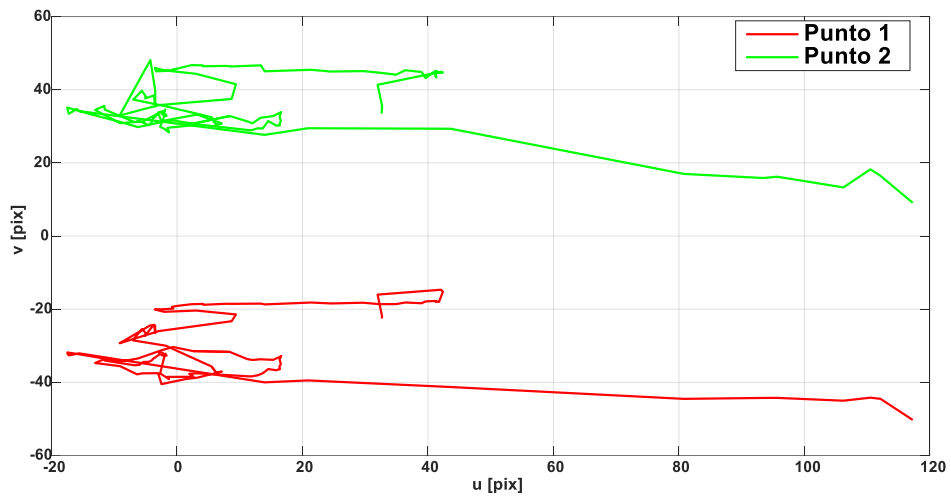
Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis



**Fig. 48-5** Velocidad de control para la articulación 2 - experimentación 2 considerando realimentación visual

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

Finalmente, el desplazamiento del objeto se grafica en la Fig. 49-5, la cual determina las posiciones variables que tiene la esfera en el plano tridimensional.



**Fig. 49-5** Desplazamiento del objeto en el plano de imagen – experimentación 2 considerando realimentación visual

Realizado por: Marlon Antonio Santamaría Villacis

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- El modelo matemático de la cámara basado en Pinhole permite obtener la velocidad de desplazamiento de objetos captados en imagen. El principio del modelo asume que para el par de píxeles del plano de imagen existe un correspondiente trio de valores en el espacio, convirtiendo una componente tridimensional dada por el objeto real en bidimensional dada por la imagen captada.
- El modelo cinemático describe los movimientos de la plataforma móvil y la estructura articular. Para esto, las velocidades de los motores y sus posiciones son consideradas con el objetivo de usarlo en el diseño de los algoritmos de control propuestos.
- El modelo cinemático de la cámara y el modelo cinemático de la plataforma móvil más la estructura articular permiten obtener un control coordinado para el seguimiento de objetivos mediante retroalimentación visual. Es decir, las características extraídas de la imagen retornan las velocidades del robot necesarias para conseguir los objetivos de control.
- La composición de dos cámaras permite adquirir información de posición en los ejes X, Y, Z. La separación que existe entre las cámaras que apuntan al mismo objeto genera un desplazamiento del objeto en el eje horizontal del plano de imagen, información que es usada para encontrar la componente de profundidad. Además, derivando la información de posición es posible obtener un estimado de velocidad de movimiento del objetivo.
- El procesamiento de imagen es asistido por Matlab, software que incluye librerías propias para la adquisición y el tratamiento de imágenes. Para optimizar la velocidad de procesamiento, ambas imágenes adquiridas sufren de un escalamiento a grises previo a la detección del centro de la circunferencia.
- Los controladores se validan inicialmente mediante simulación. Para esto, un objeto que representa la plataforma móvil y la estructura articular se diseña en Matlab. Simulando los algoritmos de control propuestos se determina un adecuado funcionamiento, observando que los errores tienden a cero en todos los casos probados.
- Los resultados experimentales documentados validan el adecuado funcionamiento del mecanismo robótico y de los controladores propuestos, tanto del que considera un punto

de interés como del que considera la retroalimentación visual. Adicionalmente, las gráficas de errores y las velocidades de control de la estructura móvil y de las articulaciones se presentan con el objetivo de mostrar la correcta ejecución en un entorno real.

## **6.2. Recomendaciones**

- El presente trabajo de titulación sirve de base investigativa para futuros proyectos similares que involucren modelación matemática, control y retroalimentación visual.
- Todas las pruebas experimentales deben considerar condiciones de luz estables para eliminar problemas de detección del objetivo.
- Mantener una distancia entre cámaras fija para todos los procesos experimentales, permitiendo una correcta triangulación del objetivo cuando se implemente la visión estéreo.
- Revisar el nivel de las baterías del robot antes de realizar las pruebas de funcionamiento. El uso indebido del robot podría ocasionar daños permanentes en el sistema eléctrico-electrónico o causar daño permanente en los almacenadores de energía.

## BIBLIOGRAFÍA

- Al-Rahayfeh, A., & Faezipour, M.** (2013). Eye tracking and head movement detection: a state-of-art survey. *iee journal of translational engineering in health and medicine* .
- Alvarez, L., Gomez, L., & Sendra, R.** (2010). Algebraic lens distortion model estimation. *image processing on line*, 1-10.
- Andaluz, G.** (2011). Modelación, identificación y control de robots móviles. *proyecto de titulación, epn*.
- Andaluz, V. H., Chicaiza, F. A., Meythaler, A., Rivas, D. R., & Chuchico, C. P.** (2015). Construction of a quadcopter for autonomous and teleoperated navigation. *design of circuits and integrated systems (dcis), 2015 conference on*, 1 - 6.
- Andaluz, V. H., Salinas, L., Roberti, F., Toibero, J. M., & Carelli, R.** (2011). Switching control signal for bilateral tele-operation of a mobile manipulator. *2011 9th ieee international conference on control and automation (icca)*, 778-783.
- Andaluz, V., Carelli, R., Salinas, L., Toibero, J. M., & Roberti, F.** (2011). Visual control with adaptive dynamical compensation for 3d target tracking by mobile manipulators. *elsevier mechatronics*.
- Andaluz, V., Ortiz, J., Perez, M., Roberti, F., & Carelli, R.** (2014). Adaptive cooperative control of multi-mobile manipulators. *industrial electronics society, 40th annual conference of the ieee*, 2669 - 2675.
- Ang, Q.-Z., Horan, B., & Nahavandi, S.** (2013). Multipoint haptic mediator interface for robotic teleoperation. *systems journal, ieee (volume:9 , issue: 1 )*, 86 - 97.
- B. Bayle, J. Y.** (2003). Kinematic modelling of wheeled mobile manipulators. *robotics and automation*, 69-74.
- Barranco, A.** (2010). Reconocimiento de objetos a partir de visión estereoscópica. *instituto politécnico nacional, cicata legaria*.
- Barry, A. J., Oleynikova, H., Honegger, D., Pollefeys, M., & Tedrake, a. R.** (2013). Fast onboard stereo vision for uavs. *computer science and artificial intellegenc*.
- Baturone, A. O.** (2001). *robótica, manipuladores y robots móviles*. barcelona: marcombo s.a.
- Bazeille, S., Barasuol, V., Focchi, M., & al., e.** (2014). Quadruped robot trotting over irregular terrain assisted by stereo-vision. *intel serv robotics*.
- Blackman, S., & Popoli, R.** (1999). Design and analysis of modern tracking systems. *artech house*, 1-27.
- Brandão, A. S., Andaluz, V. H., Sarcinelli-Filho, M., & Carelli, R.** (2011). 3-D path-following with a miniature helicopter using a high-level nonlinear underactuated controller. *2011 9th ieee international conference on control and automation (icca)*, 434 - 439.

- Correal, R., Pajares, G., & Ruz, J. J.** (2013). Automatic expert system for 3d terrain reconstruction based on stereo vision and histogram matching. *expert systems with applications*.
- Fahmy, A.** (2013). Stereo vision based depth estimation algorithm in uncalibrated rectification. *college of computers and information technology*.
- Fareh, R., & Rabie, T.** (2015). Tracking trajectory for nonholonomic mobile manipulator using distributed control strategy. *mechatronics and its applications (isma)*, 1-6.
- Fierro, R., & Lewis, F. L.** (1998). Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks. *ieee transactions on neural networks*, 415-421.
- From, P. J., Gravdahl, J. T., & Pettersen, K. Y.** (2014). *Vehicle-manipulator system*. londres: springer.
- Fukushima, K.** (January 2013). Artificial vision by multi-layered neural networks: neocognitron and its advances. *neural networks*, 103–119.
- Han, W. S., & Daejeon, H. I.** (2015). Neuromorphic visual object detection for enhanced driving safety. *science and information conference (sai), 2015*, 721 - 726.
- Herdocia, A., Shademan, A., & Jagersand, M.** (2012). Unimodal asymmetric interface for teleoperation of mobile manipulators: a user study . *intelligent robots and systems (iros)*, 5214 - 5219.
- Inoue, Y., Hirama, T., & Wada, M.** (2013). Design of omnidirectional mobile robots with acrobat wheel mechanisms. *2013 ieee/rsj international conference on intelligent robots and systems*, 4852 - 4859.
- Jae-young Lee, S. P.** (2015). *Haptic teleoperation systems*. suiza: springer.
- Kot, T., Krys, V., Mostyn, V., & Novak, P.** (2014). Control system of a mobile robot manipulator. *control conference (iccc), 15th international carpathian* , 258 - 263 .
- L. Sciavicco, B. S.** (2000). *Modelling and control of robot manipulators*. london: mcspringer-verlag.
- Lanini, J., Tsuji, T., Wolf, P., Riener, R., & Novak, D.** (2015). Teleoperation of two six-degree-of-freedom arm rehabilitation exoskeletons. *rehabilitation robotics (icorr)*, 514 - 519.
- Lee, D. G., Cho, G. R., Lee, M. S., Kim, B.-S., Oh, S., & Son, H. I.** (2013). Human-centered evaluation of multi-user teleoperation for mobile manipulator in unmanned offshore plants. *intelligent robots and systems (iros)*, 5431 - 5438.
- Li, Z., Su, C.-Y., & Xia, Y.** (2015). *Intelligent networked teleoperation control*. berlin: springer.
- Liangliang, Y., & Noboru, N.** (2012). Human detection for a robot tractor using omni-directional stereo vision. *computers and electronics in agriculture*, 116-125.
- Lin, F., Dong, X., Chen, B. M., & Lum, K.-Y.** (2012). A robust real-time embedded vision system on an unmanned rotorcraft for ground target following. *ieee transactions on industrial electronics* , 1038 - 1049.



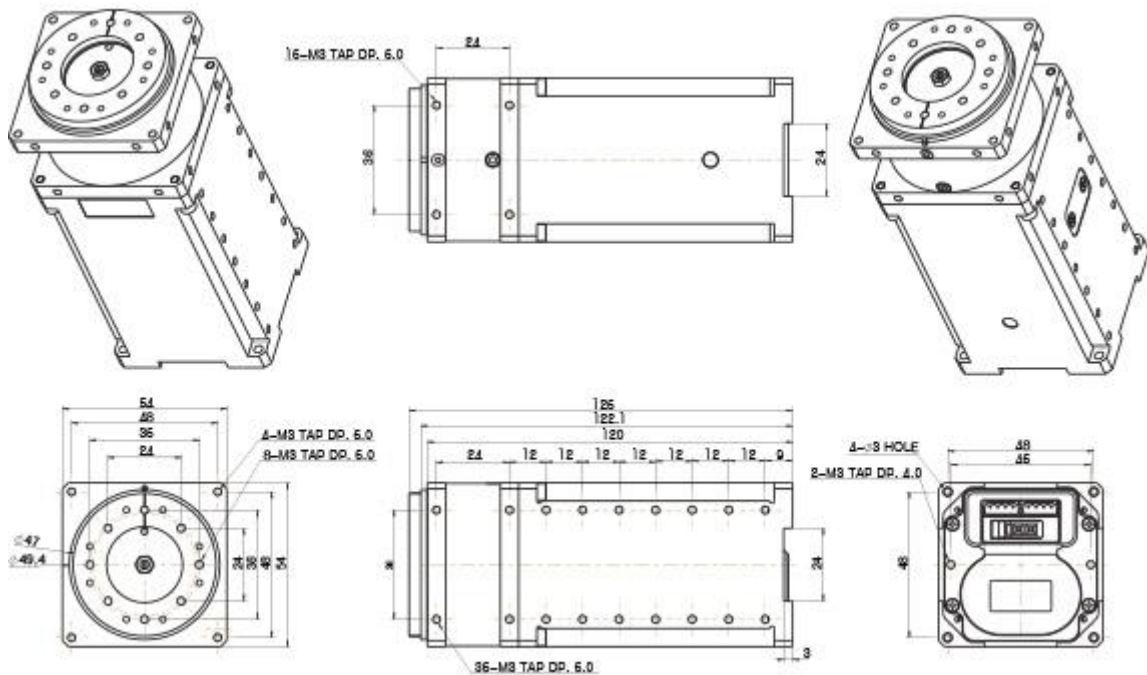
- Liu, H., Stoll, N., Junginger, S., & Thurow, K.** (2014). Mobile robotic transportation in laboratory automation: multi-robot control, robot-door integration and robot-human interaction. *robotics and biomimetics (robio), 2014 ieee international conference on*, 1033 - 1038.
- Mihelj, M., & Podobnik, J.** (2012). *Haptics for virtual reality and teleoperation*. londres : springer.
- Miranda, P. B.** (2014). Estimación de pose y velocidades de objetos en movimiento mediante visión por computadora. *instituto potosino de investigación científica y tecnológica*.
- Moreno Dueñas, F. Á.** (2015). Stereo visual slam for mobile robots navigation. *dpt. ingeniería de sistemas y automática, universidad de Málaga*.
- Muscolo, G. G., Creative & Visionary Design Lab., H. s., Recchiuto, C. T., & Molfino, R.** (2014). Vision and locomotion control systems on a bio-inspired humanoid robot. *melecon 2014 - 2014 17th ieee mediterranean electrotechnical conference*, 380 - 385.
- Nahavandi, S., Mullins, J., Fielding, M., Abdi, H., & Najdovski, Z.** (2015). Countering improvised explosive devices through a multi-point haptic teleoperation system. *systems engineering (isse)*, 190-197.
- Okumura, J., Takei, T., & Tsubouchi, T.** (2010). Navigation in indoor environment by an autonomous unicycle robot with wide-type wheel. *intelligent robots and systems (iros), 2010 ieee/rsj international conference on*, 154 - 159.
- Ortiz, J., Andaluz, V. H., Perez, G., & Morales, J.** (2015). Tele-operación bilateral de manipuladores móviles. *revista politécnica*.
- Plósz, S., Kertész, Z., Lukovszki, C., & Kovács, D.** (2013). Practical aspects of visual recognition for indoor mobile positioning. *cognitive infocommunications (coginfocom), 2013 ieee 4th international conference on*, 527 - 532.
- Portaleso.com.** (01 de Abril de 2016). *Control y robotica*. obtenido de [http://www.portaleso.com/usuarios/toni/web\\_robot\\_3/robot\\_indice.html#tipos](http://www.portaleso.com/usuarios/toni/web_robot_3/robot_indice.html#tipos)
- Ripley, D., & Politzer, T.** (2010). Vision disturbance after tbi. *neurorehabilitation*, 215–216.
- Robotics, K.** (14 de Marzo de 2016). *Kuka*. obtenido de <http://www.kuka-robotics.com>
- Rodrigues, P., Marques, F., Pinto, E., & Pombeiro, R.** (2015). An open-source watertight unmanned aerial vehicle for water quality monitoring. *oceans 2015 - mts/ieee washington*, 1-6.
- Schmid, K., Tomi, T., Rues, F., Hirschmulle, H., & Suppa, M.** (2013). Stereo vision based indoor/outdoor navigation for flying robots. *2013 ieee/rsj international conference on intelligent robots and systems (iros)*.
- Secchi, H. A.** (2008). *Una introducción a los robots móviles*. buenos aires: aadeca.
- SENPLADES.** (2013). *Plan nacional del buen vivir 2013-2017*. quito.

- Sivaraman, S., & Trivedi, M. M.** (2013). Looking at vehicles on the road: a survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis. *ieee transactions on intelligent transportation systems*.
- Starr, J. W., & Lattimer, B. Y.** (2013). Application of thermal infrared stereo vision in fire environments. *2013 ieee/asme international conference on advanced intelligent mechatronics*, 1675 - 1680.
- Sturm, P.** (2016). Pinhole camera model. *computer vision*, 610-613.
- Suárez, A., & Loaiza, H.** (2012). Navegación de un robot móvil por estereovisión. *entre ciencia e ingeniería*, 9-23.
- The MathWorks, Inc.** (20 de Mayo de 2017). *Mathworks*. obtenido de [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- Tippetts, B., Lee, D. J., Lillywhite, K., & Archibald, J.** (2013). Review of stereo vision algorithms and their suitability for resource-limited systems. *j real time image proc.*
- Xianghua Chu, F. H., Stoll, N., Klos, M., & Thurow, K.** (2015). Application of dual-arm robot in biomedical analysis: sample preparation and transport . *instrumentation and measurement technology conference (i2mtc)*, 500-504.
- Zhanga, B., Huangb, W., Wangb, C., Gongb, L., Zhaoa, C., Liua, C., & Huangb, D.** (2015). Computer vision recognition of stem and calyx in apples using near-infrared linear-array structured light and 3d reconstruction. *biosystems engineering*, 25–34.
- Zhao, Y., Woo, C., & Lee, J.** (2015). Balancing control of mobile manipulator with sliding mode controller . *control, automation and systems (iccas)*, 802-805.

## ANEXOS

### Anexo A: Características de los motores DYNAMIXEL

Servo Model	H54-200-S500-R
Rated Voltage	24 V
No Load Speed	33.1 RPM
No Load Current	1.65 A
Continuous Operation Speed	27.9 RPM
Continuous Operation Torque	44.2 Nm
Continuous Operation Current	9.3 A
Resolution	501,900 steps/rev
Gear Ratio	502
Backlash	3.8 arcmin
Interface	RS-485
Operating Temperature	5-55 C
Dimensions	54 x 54 x 126 mm
Weight	855 g



## **Anexo B: Características de las cámaras GENIUS**

<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
Sensor	Alta calidad HD
Lente de foto	Automático de gran precisión
Rotación de Lente	Rotación 360° e inclinación 90°
Video HD de 1280 x 720	tasa de hasta 30 cuadros por segundo
Video de 2MP en 1280 x 1024	tasa de hasta 30 cuadros por segundo
Micrófono	Incorporado