



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERPIENTE MODULAR CON  
CONTROL DE TRAYECTORIA POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA EXPLORACIÓN Y  
MONITOREO EN UN ENTORNO CONTROLADO.”**

**AUTOR: JIMÉNEZ TORRES, LENIN EDUARDO**

**DIRECTOR: ING. CÓRDOVA CRUZATTY, ANDREA CONCEPCIÓN**

**2019**

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un robot serpiente modular con control de trayectoria por visión artificial para exploración y monitoreo en un entorno controlado.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis de la locomoción de la serpiente, para determinar los requerimientos y limitaciones del sistema.
- Investigar y analizar el estado del arte sobre mecanismos y sistemas de control para robots que incorporen la locomoción de serpiente.
- Analizar y seleccionar componentes y materiales que cumplen con los requisitos para la finalidad del proyecto.
- Diseñar y simular el sistema mecánico del robot al igual que su locomoción, mediante un software de diseño asistido por computador.
- Manufacturar e implementar el robot, con todos sus componentes.
- Diseñar e implementar el sistema de control, el cual incorpore un sistema de visión artificial para el control de su trayectoria y un control de locomoción de serpiente.
- Validar la hipótesis mediante el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento.

# HIPÓTESIS

Es posible la exploración y monitoreo en un entorno controlado mediante el control por visión artificial de la trayectoria de un robot modular con locomoción de serpiente.

# LOCOMOCIÓN DE SERPIENTE

Depende de la estructura anatómica del reptil, dada su especie

- Boas
- Pitones
- Víboras
- Culebras



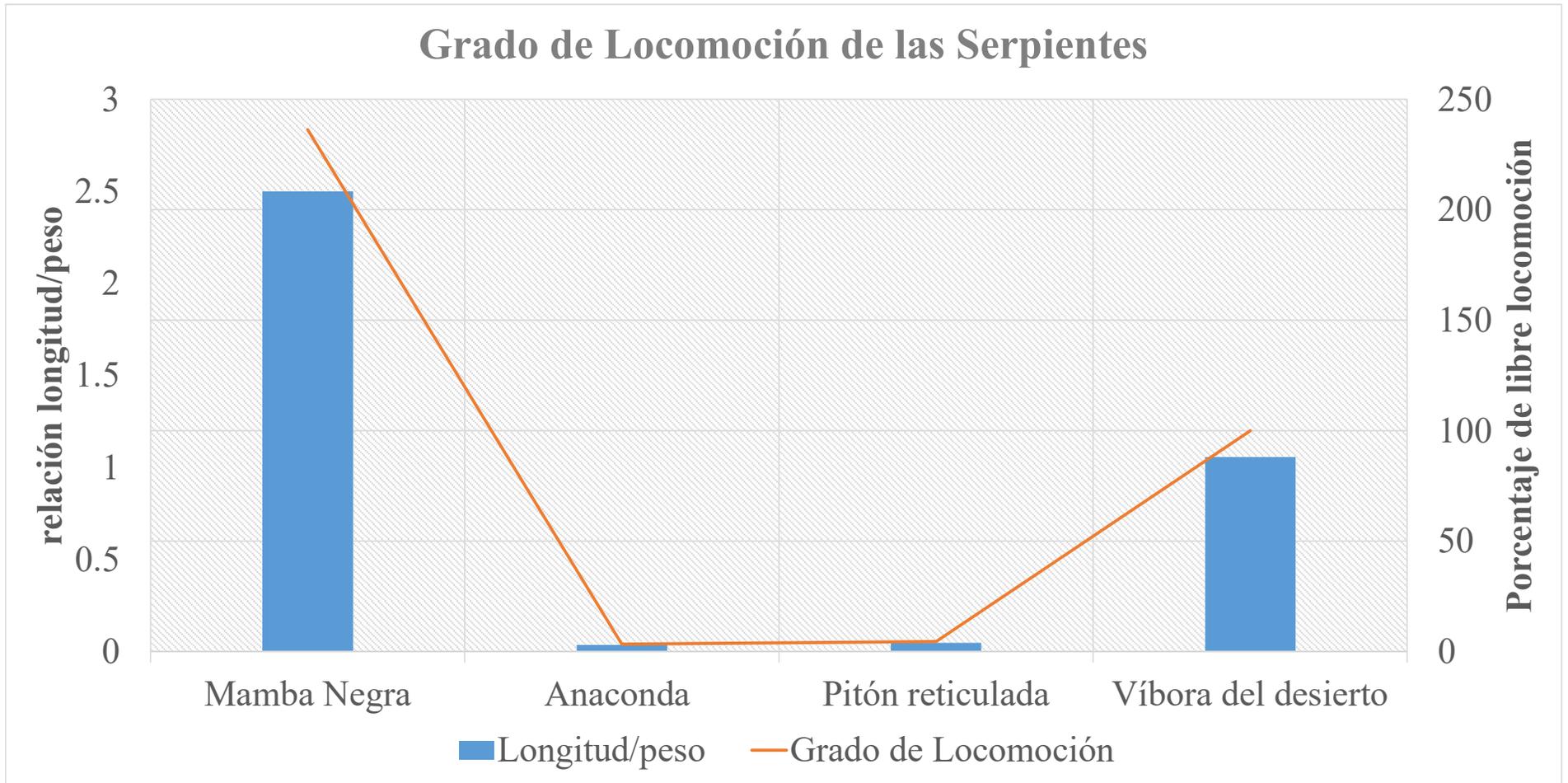
Fuente: (Ramos, 2015)

# FACTORES DE LA LOCOMOCIÓN

- Grado de locomoción de una serpiente

Serpiente	Peso (Kg)	Longitud	Longitud/peso	Velocidad (Km/h)	Grado de Locomoción
Mamba Negra	1.6	4	2.5	20	236.22
Anaconda	230	8.45	0.037	8	3.47
Pitón reticulada	158	7.67	0.049	1.6	4.59
Víbora del desierto	1.2	1.27	1.058	28	100

## Grado de Locomoción de las Serpientes



Curva de relación entre el peso-longitud con la locomoción de las serpientes

# FACTORES DE LA LOCOMOCIÓN

- Fricción

Escamas ventrales

Anisotropía Friccional



Fuente: (Wei, 2014)

# FACTORES DE LA LOCOMOCIÓN

- Distribución del peso

Puntos de contacto o apoyo

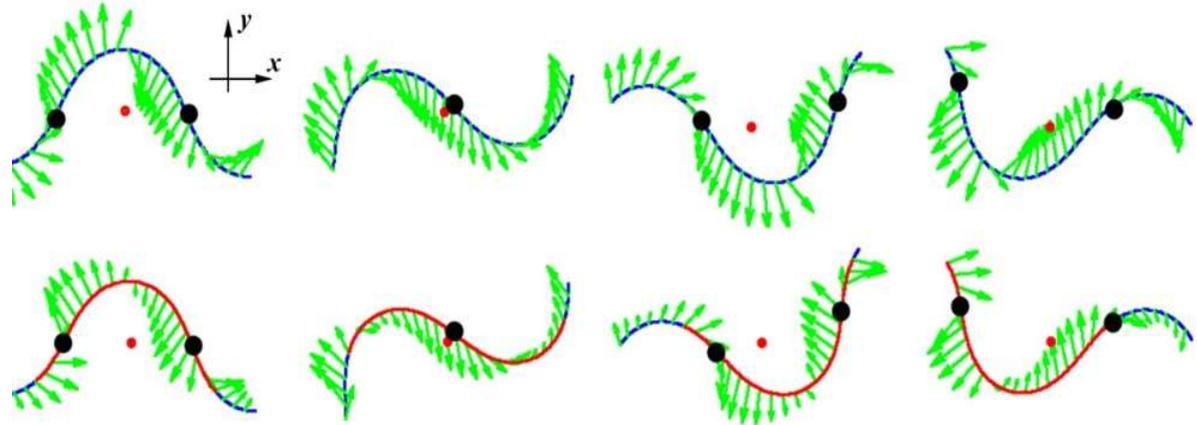


Fuente: (Wei, 2014)

“La mecánica de la locomoción deslizante”



Tres puntos de apoyo para distribución de masa

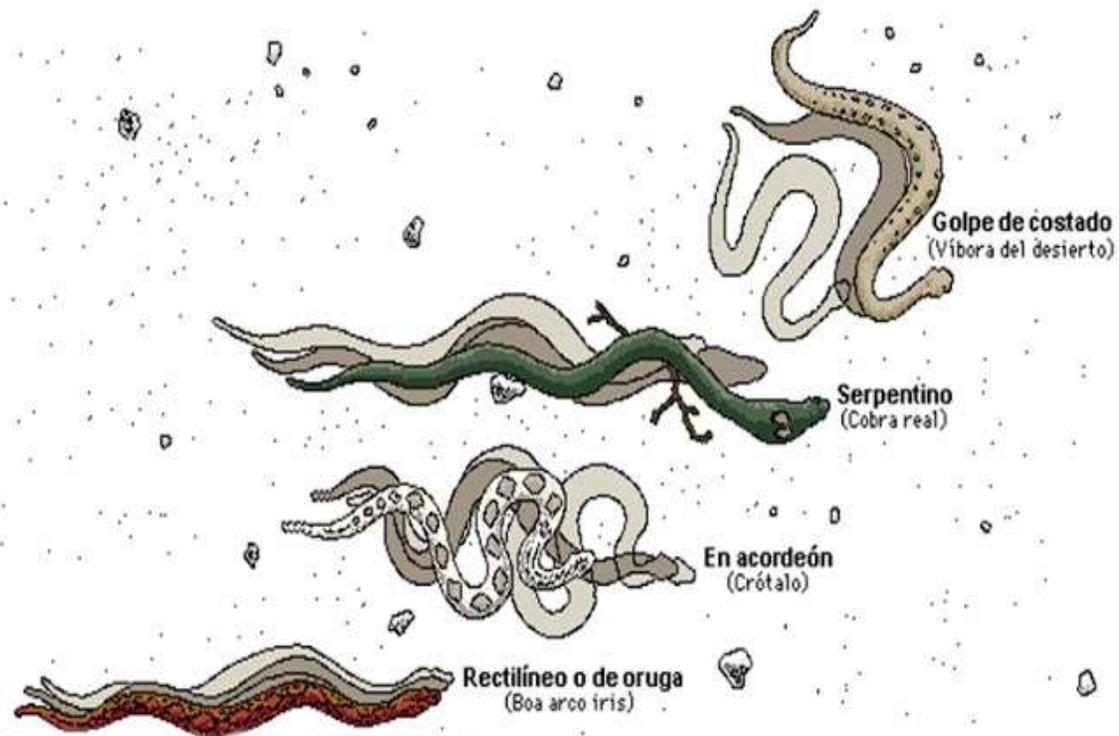


Fuente: (David L. Hu, 2009)

# Principios fundamentales locomoción de una serpiente

- a) El grado de locomoción de una serpiente depende de la relación entre su peso y su tamaño
- b) Para reposicionar la estructura durante la locomoción horizontal se requiere de una elevación entre 2 y 5 cm del miembro en cuestión.
- b) En la parte ventral se produce la fricción necesaria para su desplazamiento
- c) Existe concentración de la carga del peso corporal en tres puntos de su cuerpo, al inicio, mitad y final.

# TIPOS DE LOCOMOCIÓN



Fuente: (Pérez, 2012)

# Movimiento horizontal

Seguimiento y cambio de trayectoria

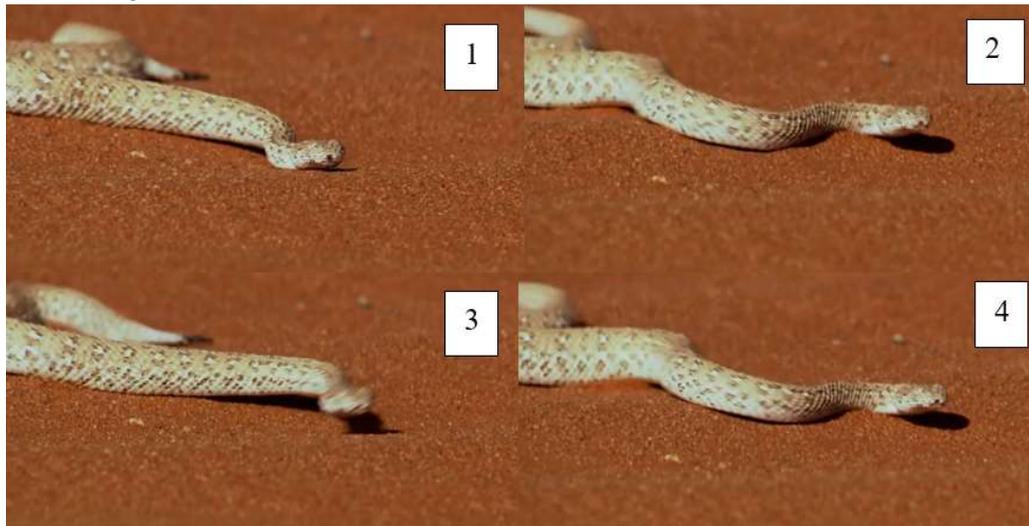


Movimiento horizontal de una serpiente

Fuente: (Lab, 2015)

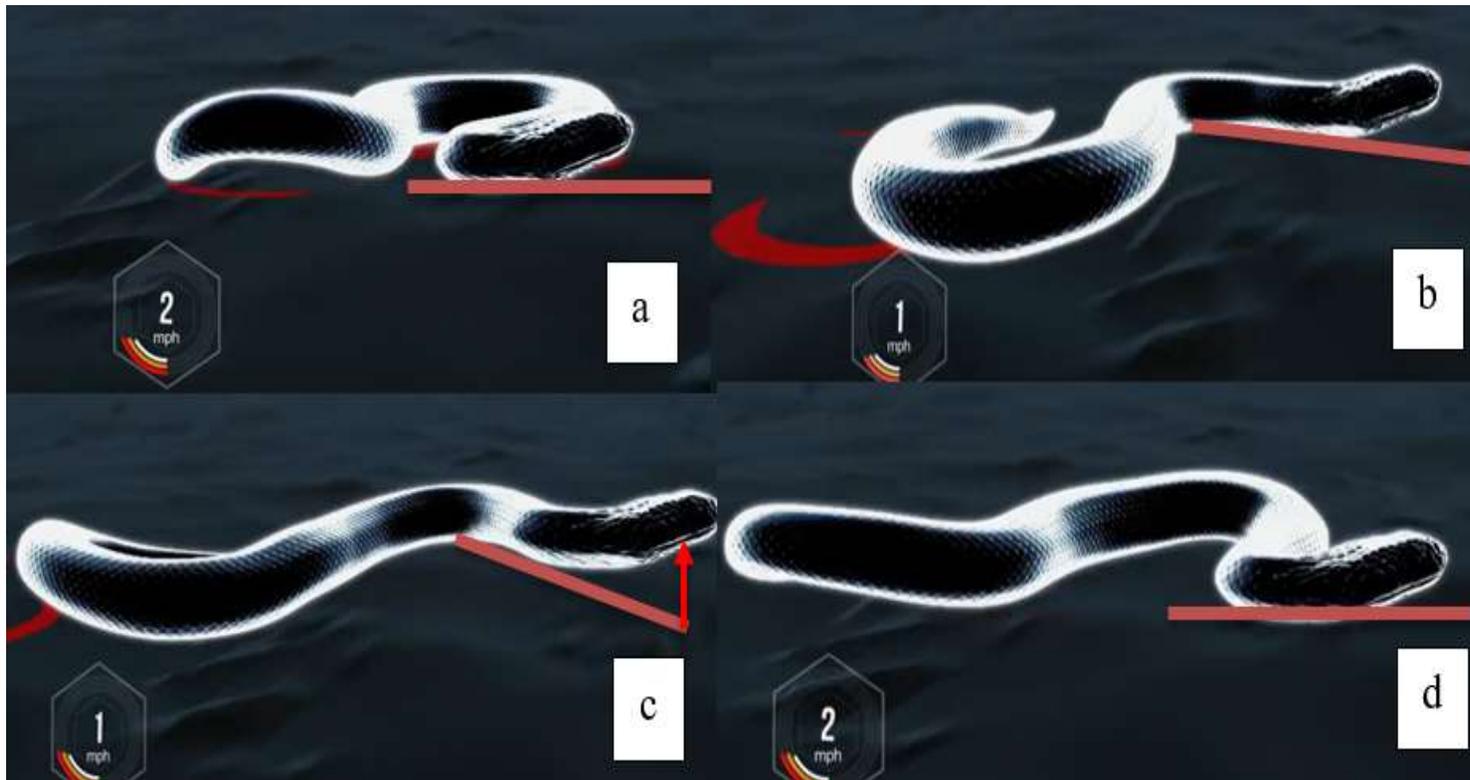
# Movimiento Vertical en desplazamiento

- Reposicionamiento para la Anisotropía Friccional
- Permite el reposicionamiento en la locomoción horizontal.
- Elevación entre 2 y 5 cm



Secuencia de movimiento durante el desplazamiento de la vívora cornuda

Fuente: (smithsonianchannel, 2019)



Análisis del movimiento vertical durante el desplazamiento, a) Posición inicial, b) Toma de impulso, c) Elevación vertical y rotación lateral, d) Reposicionamiento

Fuente: (smithsonianchannel, 2019)

# CLASIFICACIÓN DE ROBOTS SERPIENTE

## 1. Robot serpiente ápodo



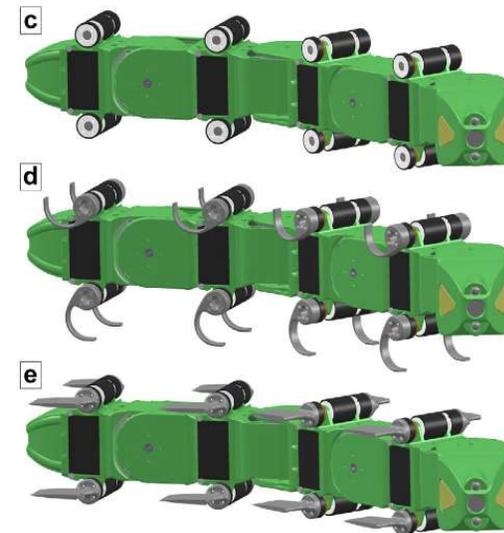
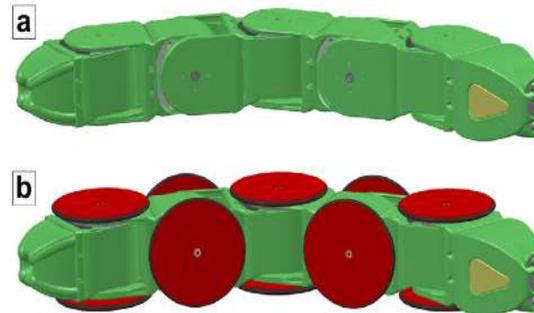
Robot ápodo Cube Revolutions

Fuente: (Gonzalez, 2008)

# CLASIFICACIÓN DE ROBOTS SERPIENTE

## 2. Robot serpiente propulsado

- a) sin propulsión
- b) por ruedas pasivas
- c) por ruedas activas
- d) por patas rotativas
- e) por aletas para operar en agua



*Sistema de propulsión de Mamba*

Fuente: (InfoSerpientes, 2018)

# Requerimientos y Limitaciones del Sistema.

## 1. Del Sistema Mecánico

- Estructura Modular
- Motricidad en tres ejes perpendiculares entre si
- Distribución de su peso y propulsión
- El menor peso y ser compactos, con el fin de disminuir la carga e inercia.
- Estructura lineal y simétrica con el fin de tener un único eje de acción y de control.

# Requerimientos y Limitaciones del Sistema.

## 2. Grados de libertad

- Motricidad angular en tres ejes ortogonales
- Desplazamiento Tangencial

## 3. Número de Módulos

- Tres de distribución de masa y apoyo/propulsión
- Dos articulares

# Requerimientos y Limitaciones del Sistema.

## 4. Locomoción

- Locomoción serpentina
- Terreno plano
- Seguimiento de un módulo guía
- Dirección de desplazamiento por Visión Artificial
- Propulsión por ruedas activas.
- Elevar al menos 2 cm
- Estabilidad y equilibrio por torsión
- Evasión de obstáculos

# COMPONENTES DEL SISTEMA

- SENSORES
  - Sensor de Imagen: PC-Cámara (640x480 pxls, CMOS)
  - Sensor de distancia: Sharp GP2Y0A41SK-F
  - Sensor Encóder: Chihai Motor Encoder CHR-GM25
- ACTUADORES
  - Servomotores: Tower Pro MG – 996R
  - Motores: Chihai CHR-GM25-370
- FUENTE DE ALIMENTACIÓN
  - Winstar WS-ATX
- DISPOSITIVO DE CONTROL
  - Arduino Mega 2560

# MÉTODO DE MANUFACTURA

- Esterolitografía –SLA
- Sinterización Selectiva Láser – SLS
- Corte y Laminado
- **Deposición de hilo Fundido – FDM**
- Inyección en molde
- Mecanizado CNC

# MATERIAL ESTRUCTURA

- PLA: Ensayos ingeniero César Galera (Control 3D, 2018)
- Criterios:
  - Resistencia a Impactos
  - Resistencia a esfuerzos combinados

*Tabla 15. Selección de Material*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>
Resistencia a la tracción	65Mpa	46 Mpa
Resistencia a la Flexión	230Mpa	72Mpa
Fuerza de impacto	1.7 KJ/m	0.19 KJ/m

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

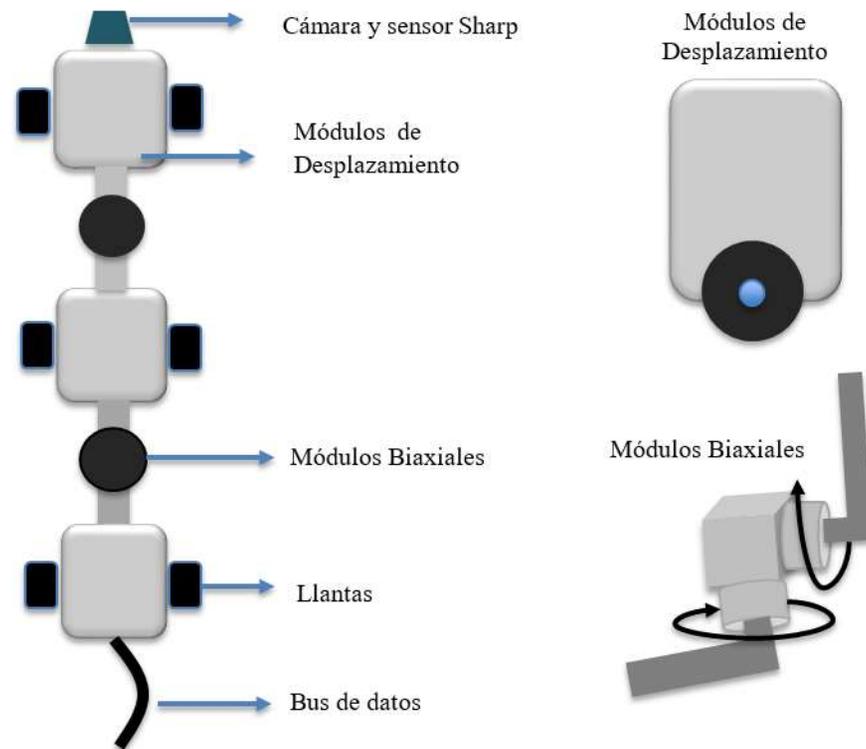


Figura 19. Esquema de estructura del sistema mecánico

# Análisis Dinámico

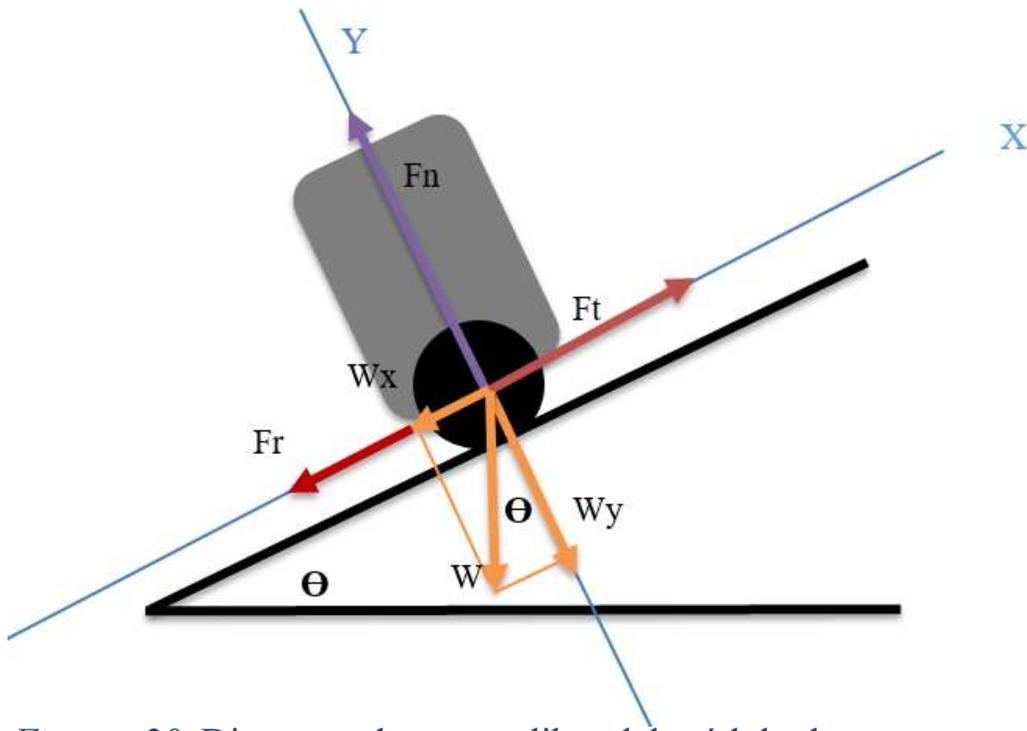


Figura 20. Diagrama de cuerpo libre del módulo de desplazamiento en operación

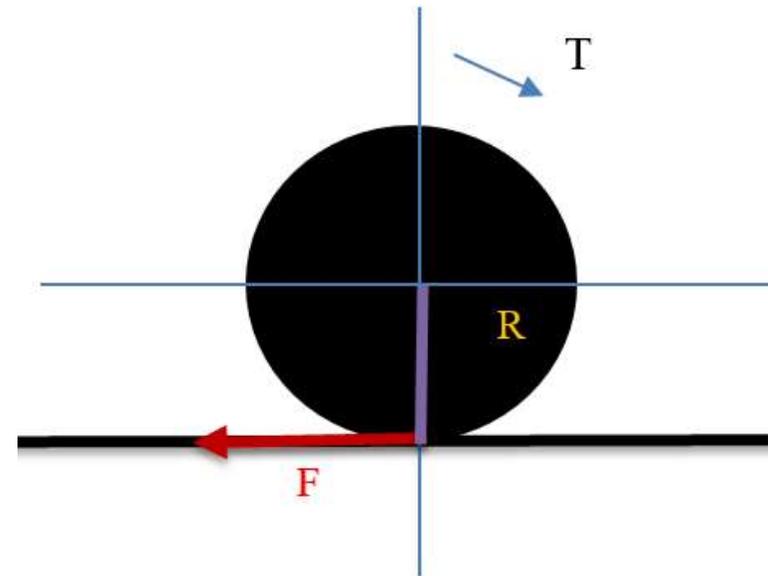


Figura 21 Diagrama de fuerza de Avance del módulo de desplazamiento

# Análisis Dinámico

$$\sum Fx = m \cdot a$$

$$\sum Fy = 0$$

$$Ft = W \cdot \text{Sen}(\theta) + 2 \cdot Uc \cdot W \cdot \text{Cos}(\theta) + m \cdot a$$

$$Ft = \frac{T}{R}$$

- 7.173N y 2.194 Kg.cm
- Motor Chihai CHR-GM25-370, 140rpm i45, 3.4 Kg.cm.

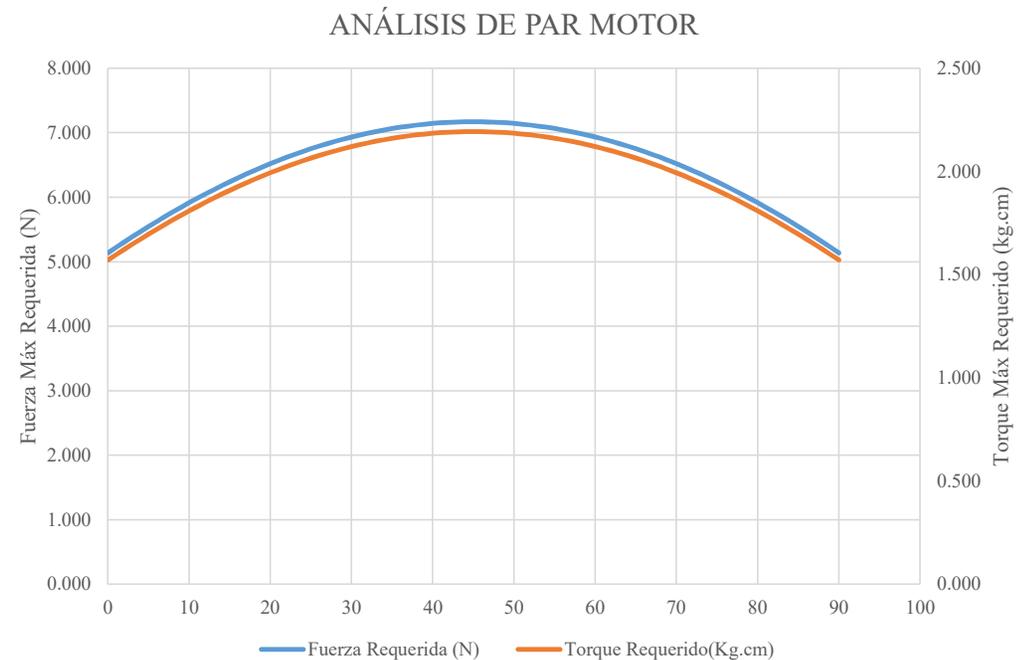
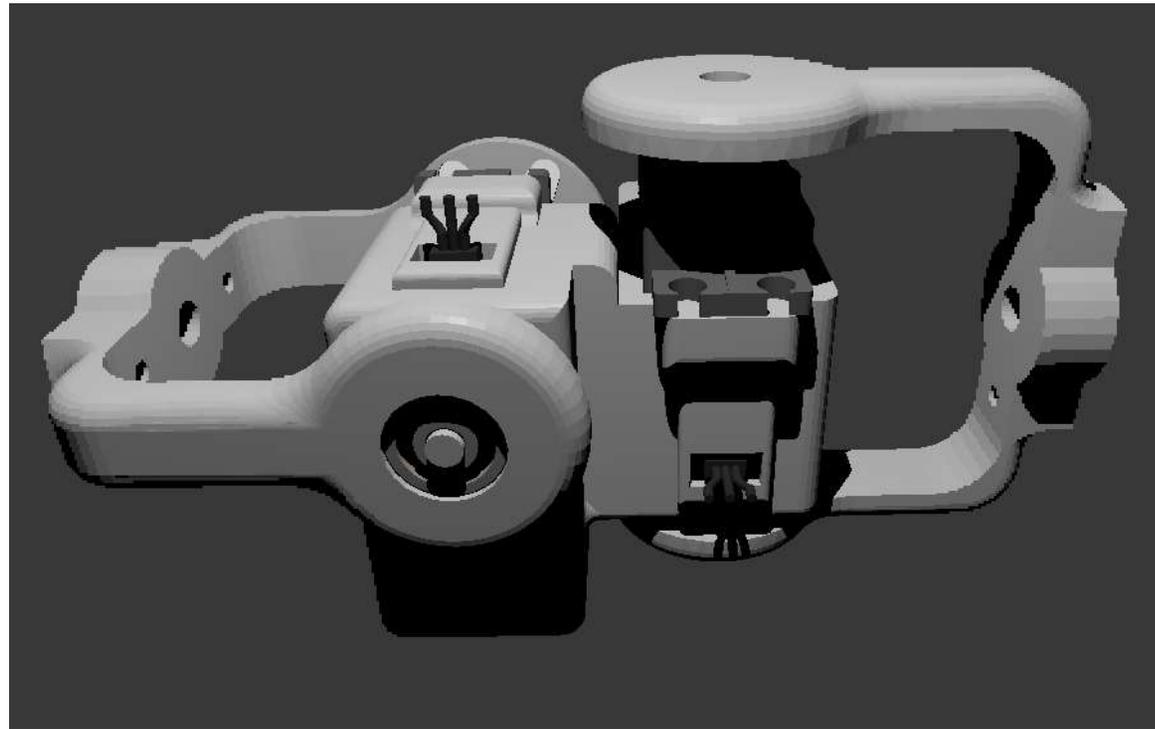


Figura 22. Análisis de par

# Diseño de Módulos

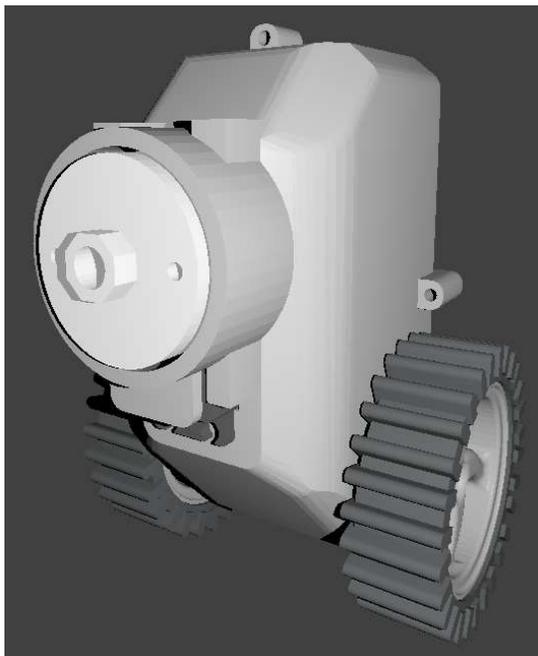
## A) Módulo Biaxial



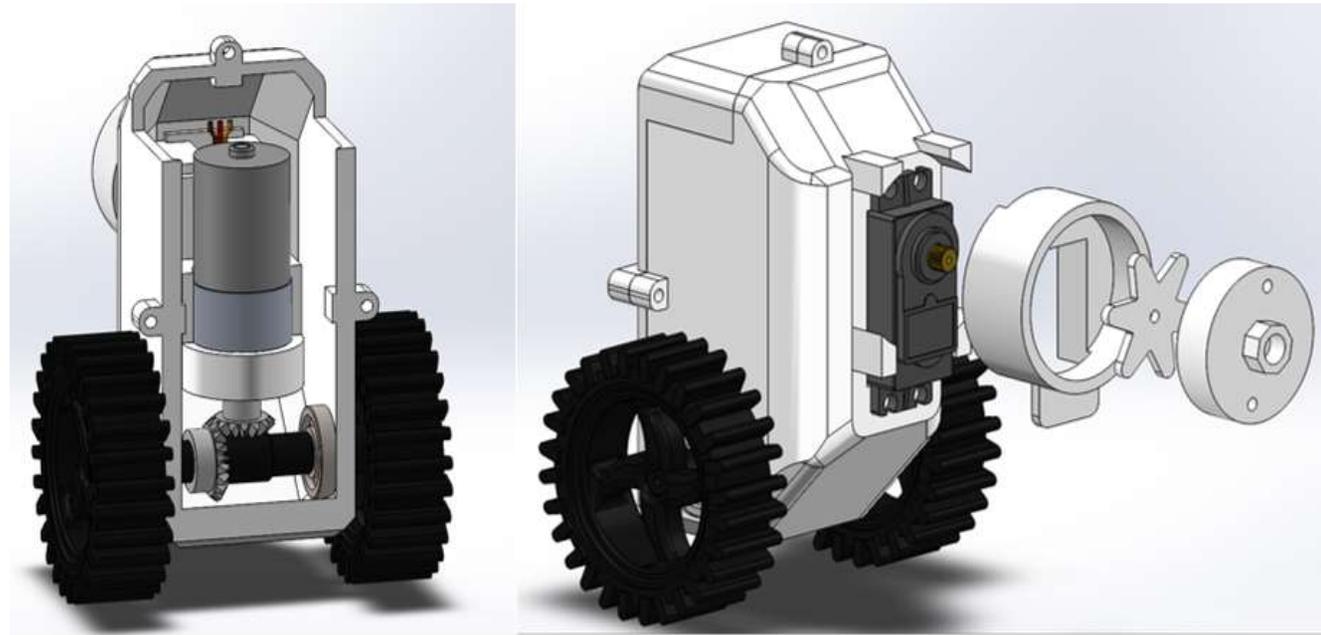
*Figura 25. Módulo Biaxial*

# Diseño de Módulos

## B) Módulo de Desplazamiento



*Figura 26. Módulo de Desplazamiento ensamblado*



*Figura 27. Explosión de módulo de direccionamiento*

# Diseño de Módulos

## C) Módulo Guía

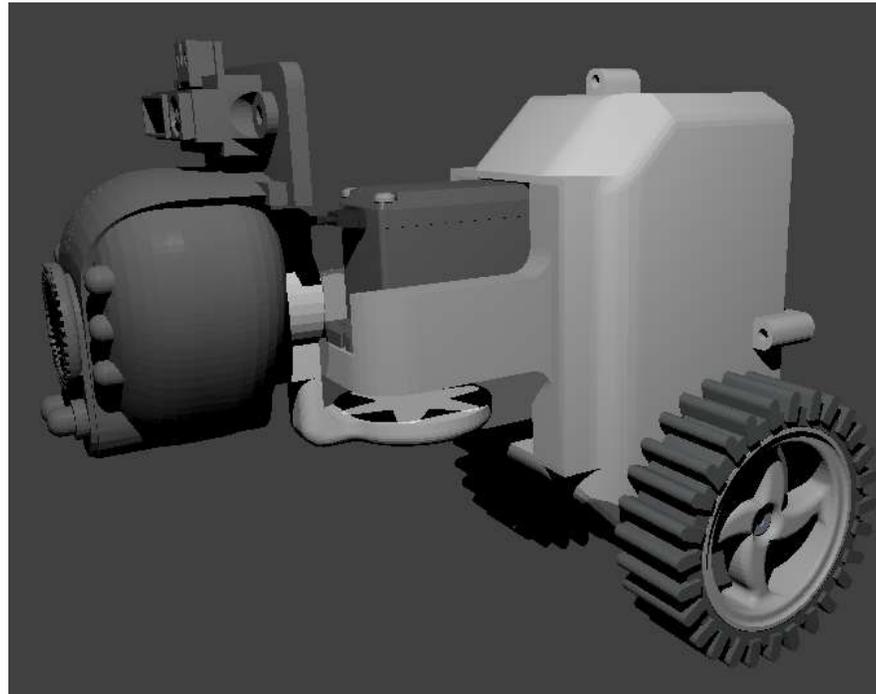
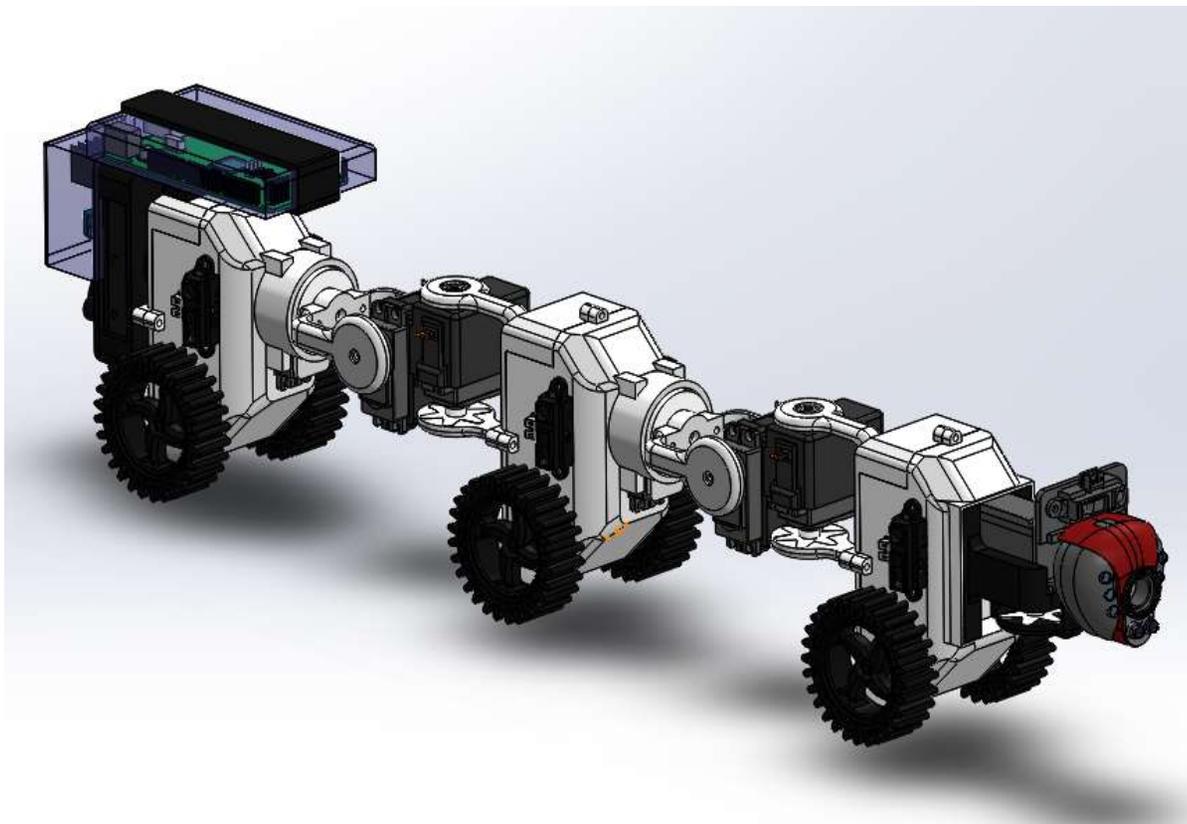


Figura 29. *Ensamble módulo de dirección*

# Ensamble



*Figura 30.* Ensamble sistema mecánico

# Sistema de referencia

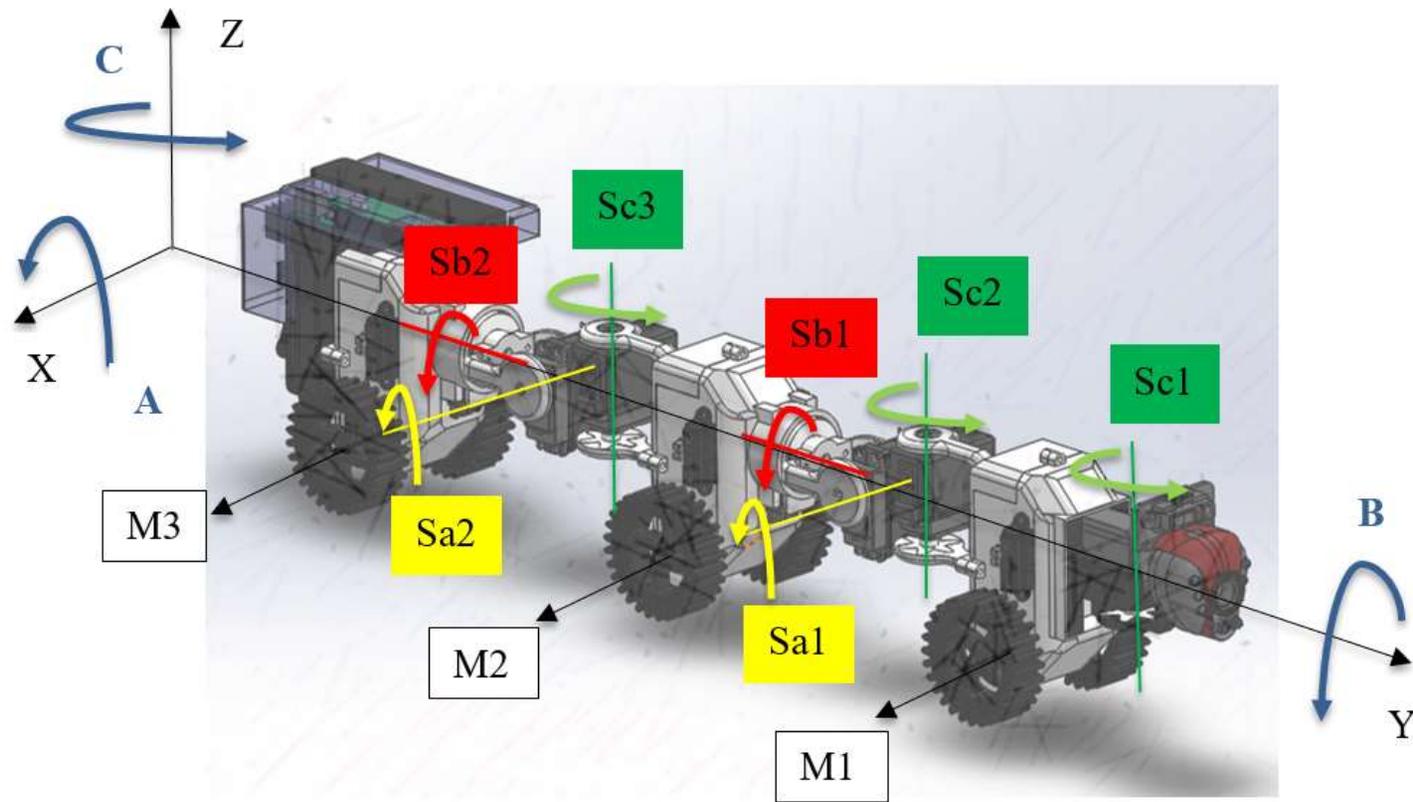


Figura 32. Ejes de referencia sobre actuadores

# Análisis Estático Estructural

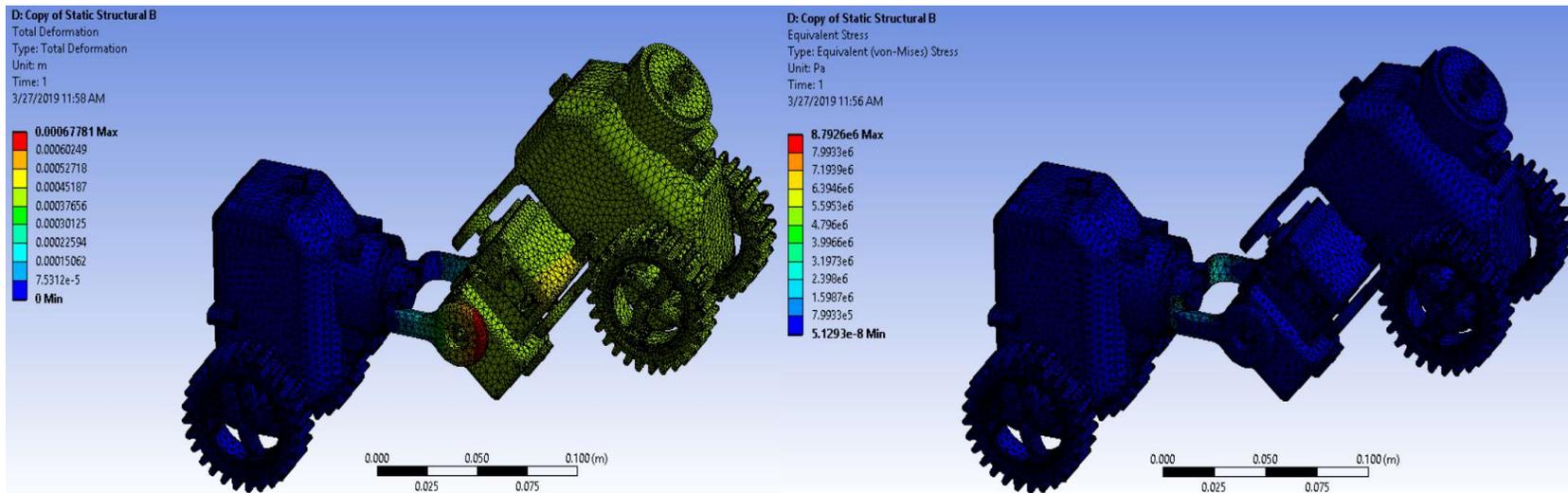


Tabla 17. Valores resultantes de diseño para operación efectiva

Nombre	Valor
Deformación Máxima	0.6778 mm
Factor de seguridad	9.8037

(Mott P.E., 2006)

# Análisis Cinemático

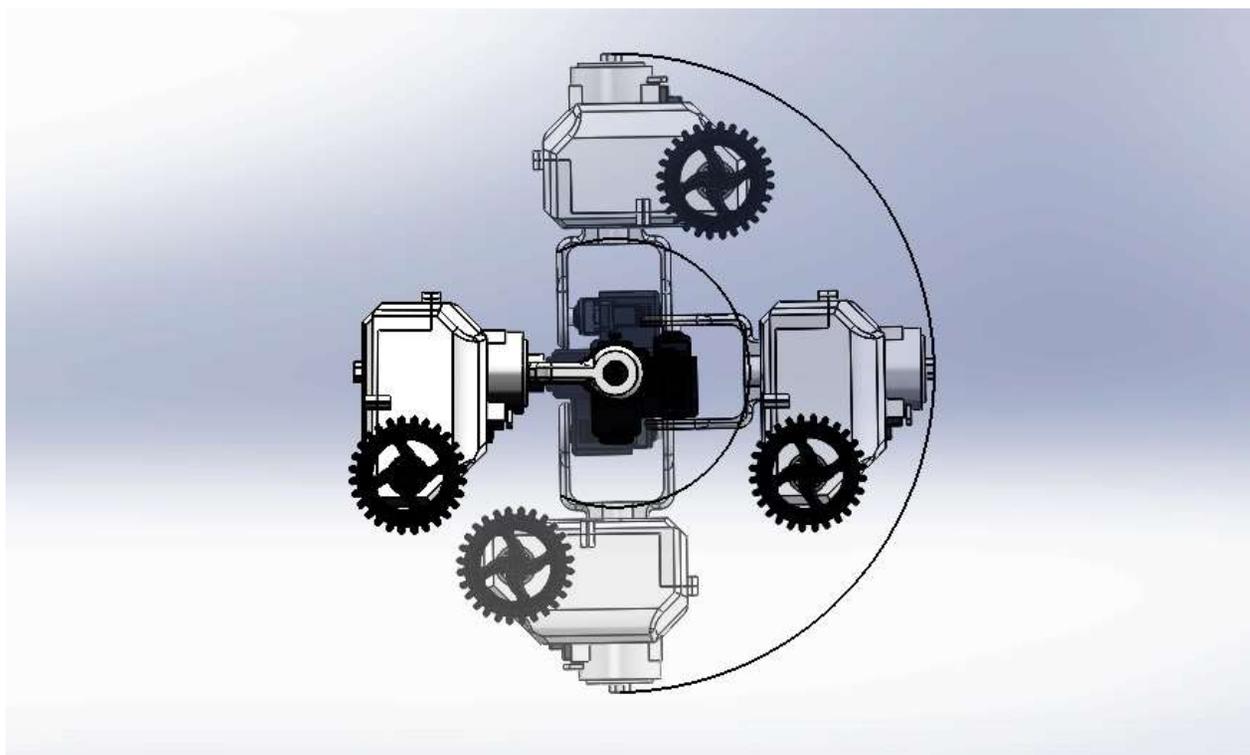
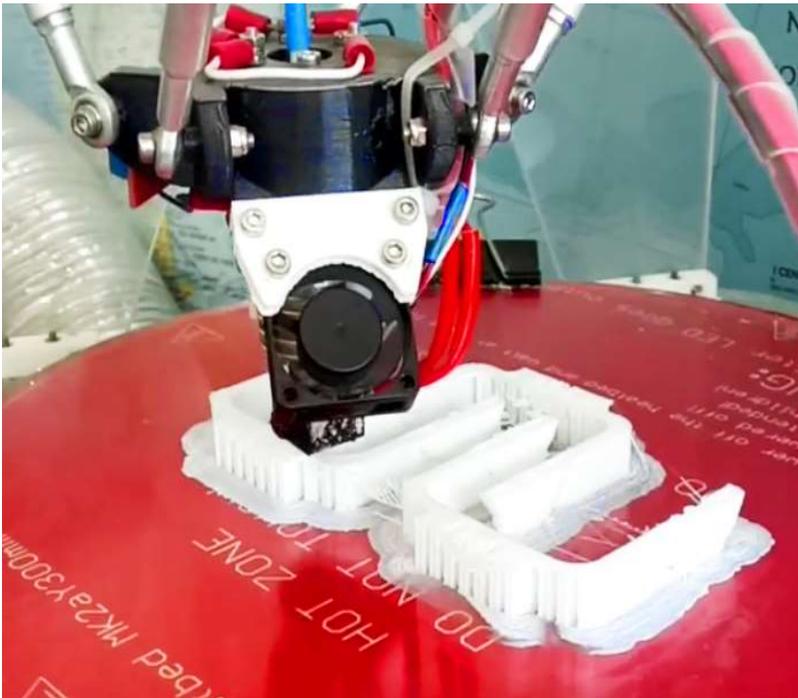


Figura 43. *Análisis cinemático de curva de trayectoria*

# Manufactura del Sistema Mecánico

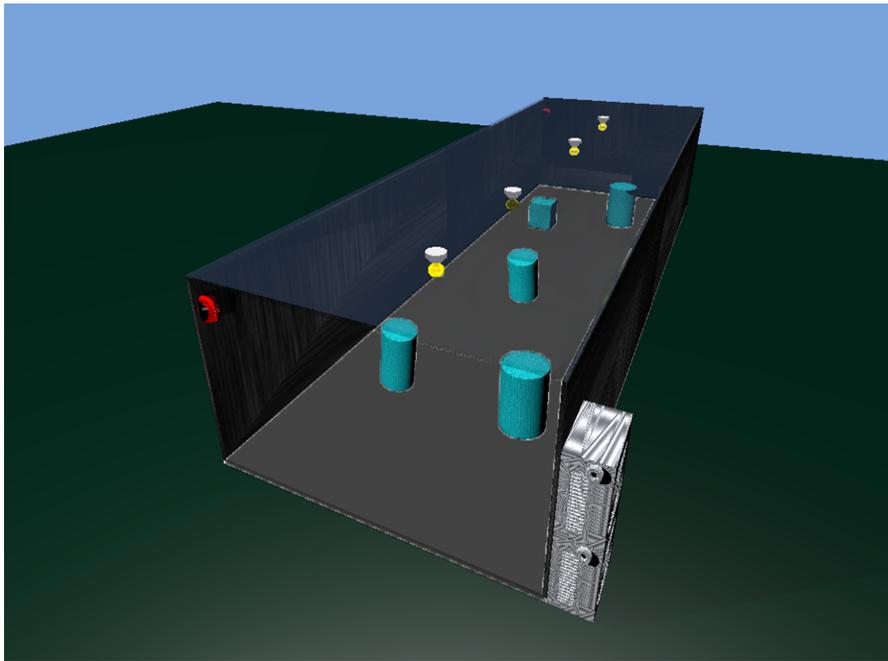


*Figura 44.* Impresión PLA FDM de estructura mecánica



*Figura 47.* Ensamble del sistema mecánico

# Diseño e implementación del Escenario



*Figura 48.* Diseño del entorno controlado, vista externa



*Figura 50.* Implementación de entorno controlado, vista externa

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

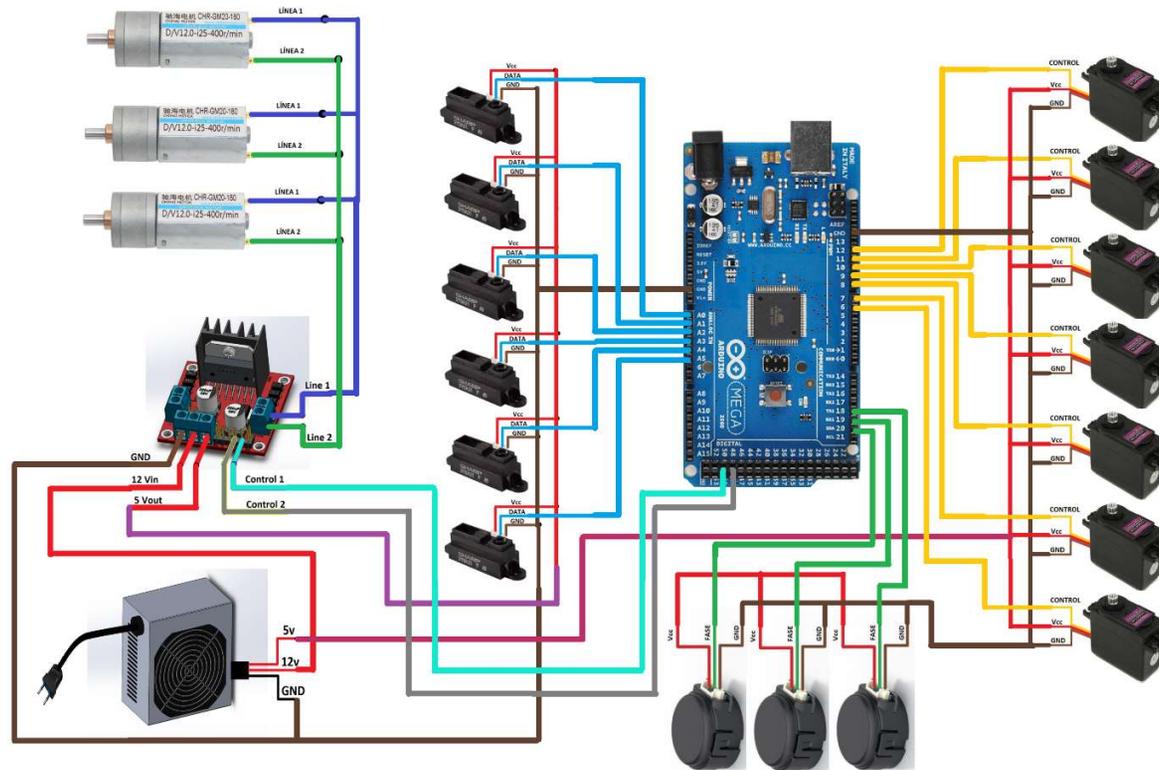
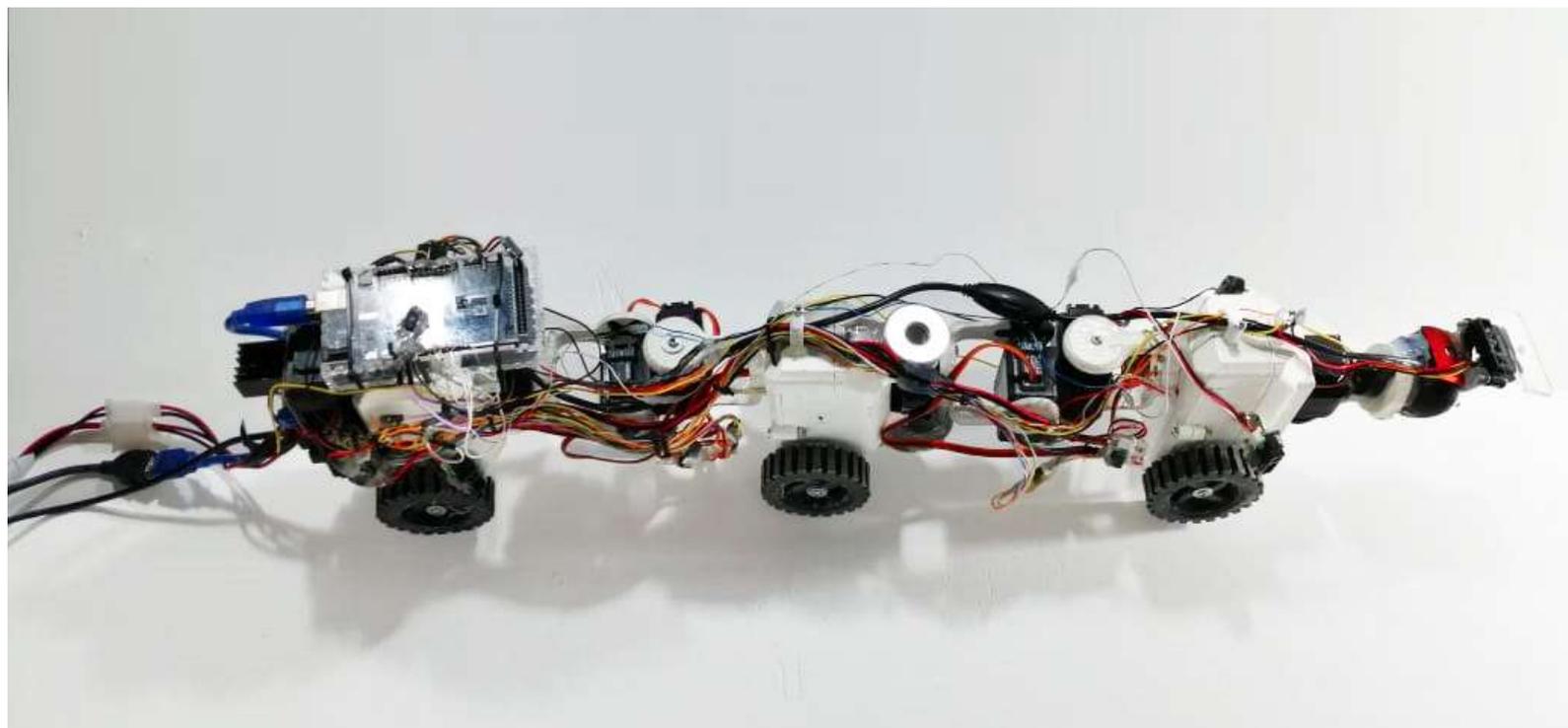


Figura 53. Diagrama de conexión del Sistema electrónico

# Implementación del Sistema Electrónico



*Figura 54.* Implementación de sistema electrónico

# Piel de Protección

- Supplex, tela sintética de nylon



*Figura 55.* Implementación de piel protectora

# SISTEMA DE CONTROL

## A) Variable manipulada:

“Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada” (Ogata, 2010)

- Desplazamiento parcial

## B) Variable controlada

“Es la cantidad o condición que se mide y controla” (Ogata, 2010)

- La trayectoria del robot

# Perturbaciones

- Colisiones
- Rozamientos involuntarios con las ruedas
- Errores de posicionamiento de servos
- Errores de captura de imagen
- Tensión en cableado

# Estructura del Sistema de Control

1. Sistema de Visión Artificial
2. Sistema de Control de Locomoción
3. Sistema de Control de Trayectoria

# 1. Sistema de Visión Artificial

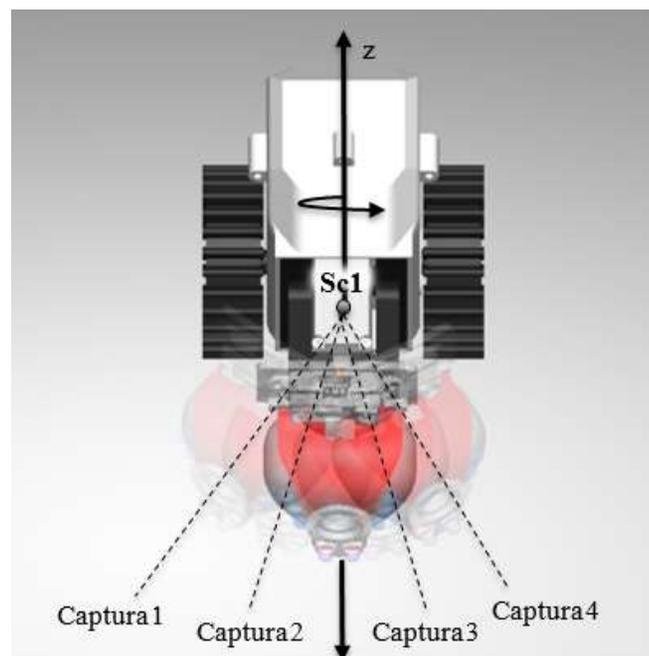
- Identificar objetos:

Espacios de color

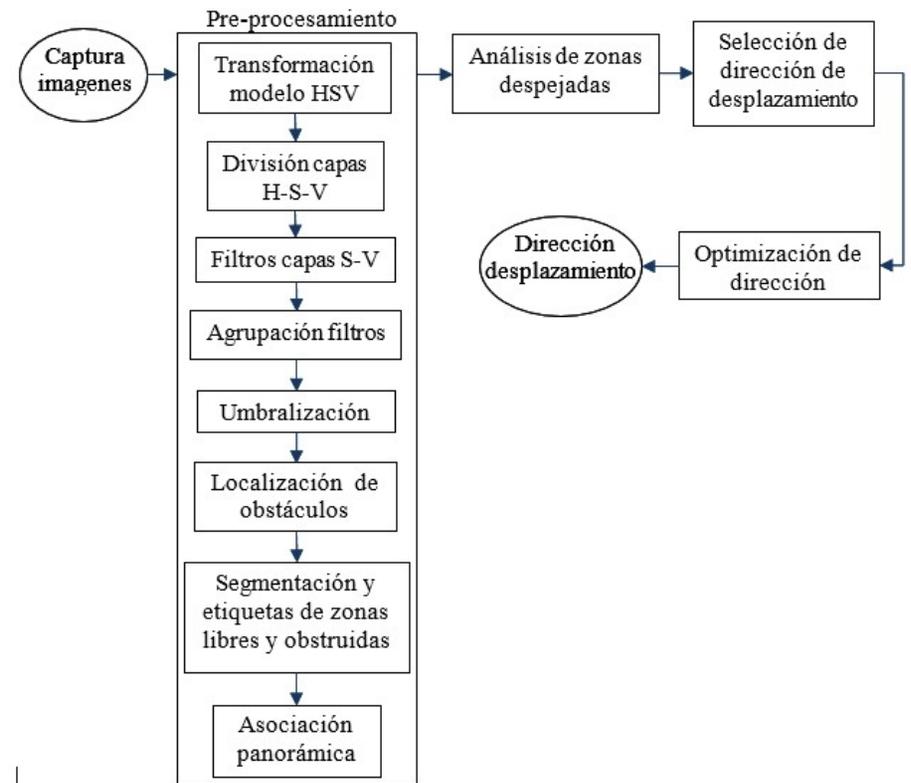
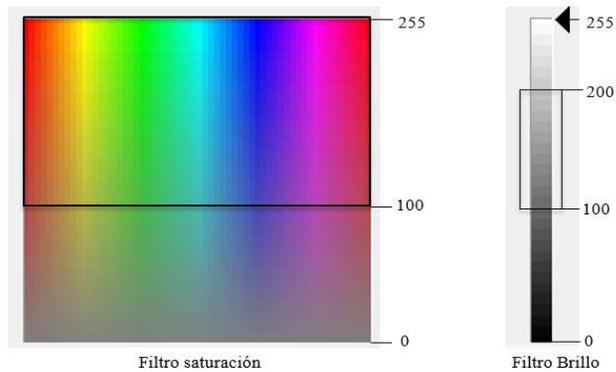
- Determinar la dirección libre de obstáculos de forma panorámica:

Área de seguridad

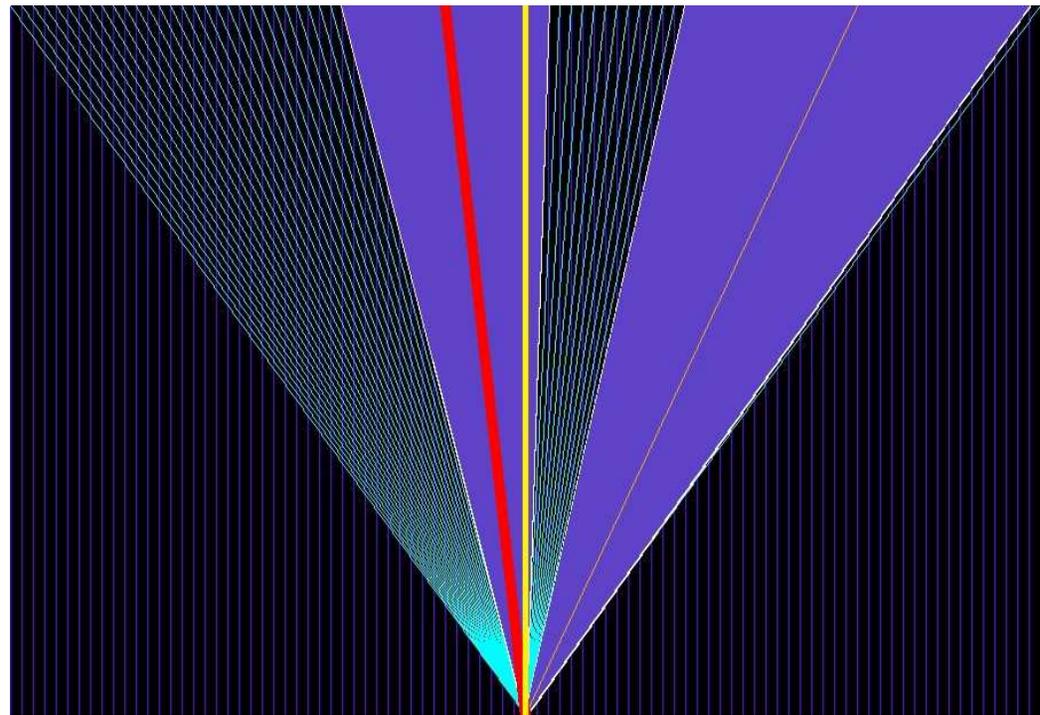
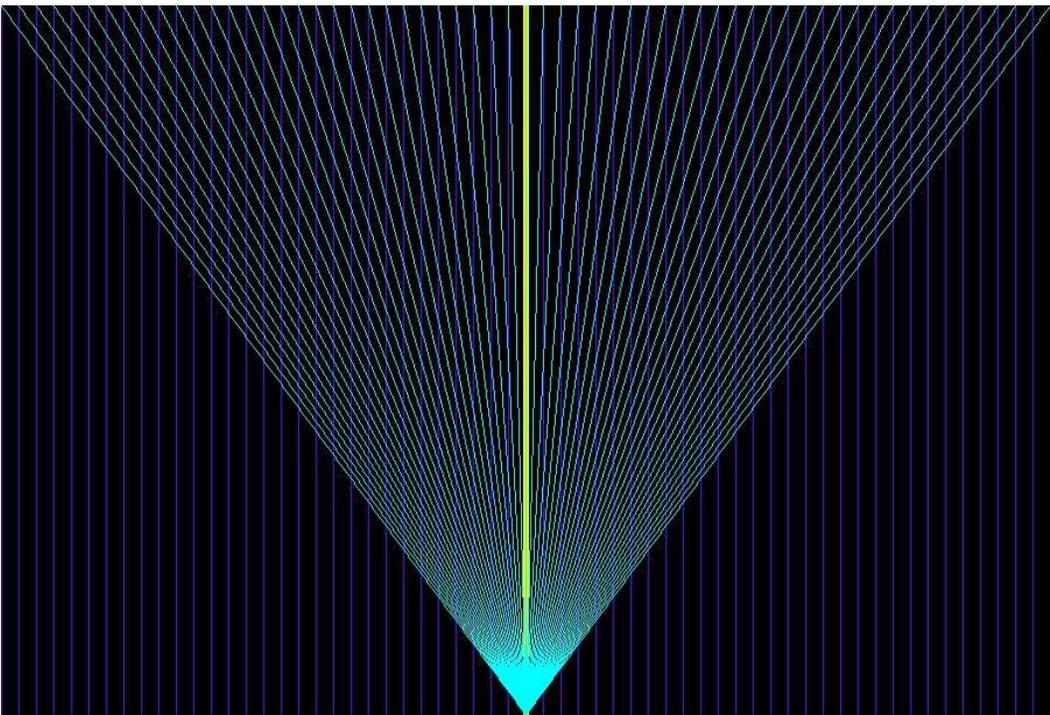
# Captura panorámica



# Proceso de Análisis por Visión Artificial



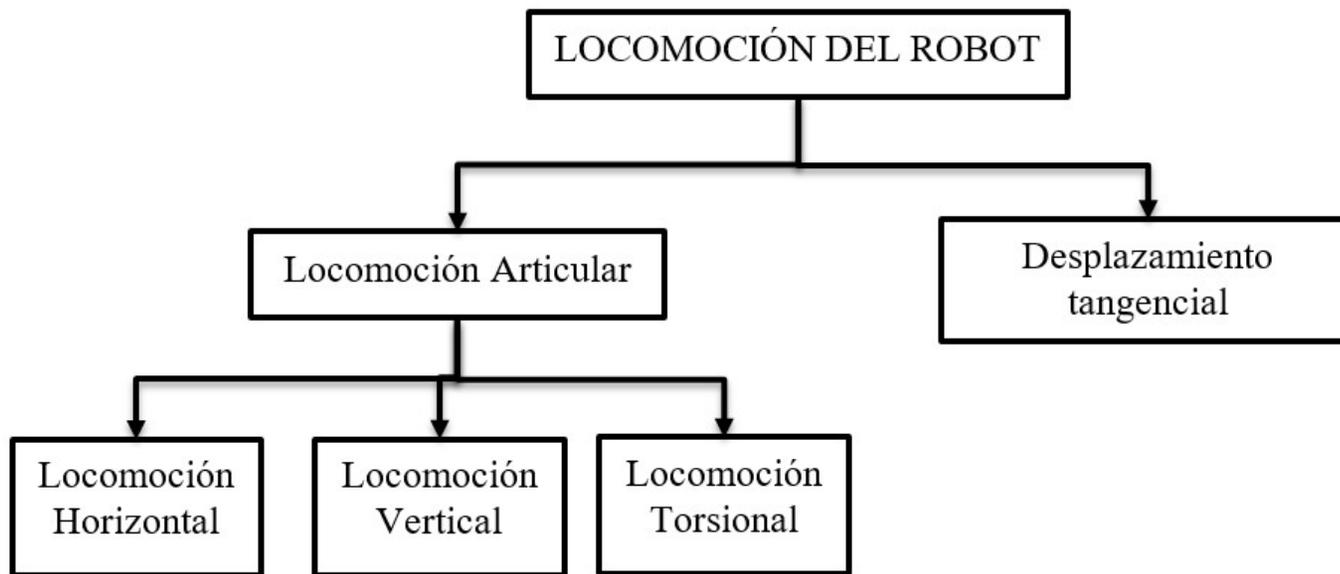
# Resultados de análisis por visión Artificial



Proyección panorámica

Identificación de dirección de  
Desplazamiento

## 2. Sistema de Control de Locomoción

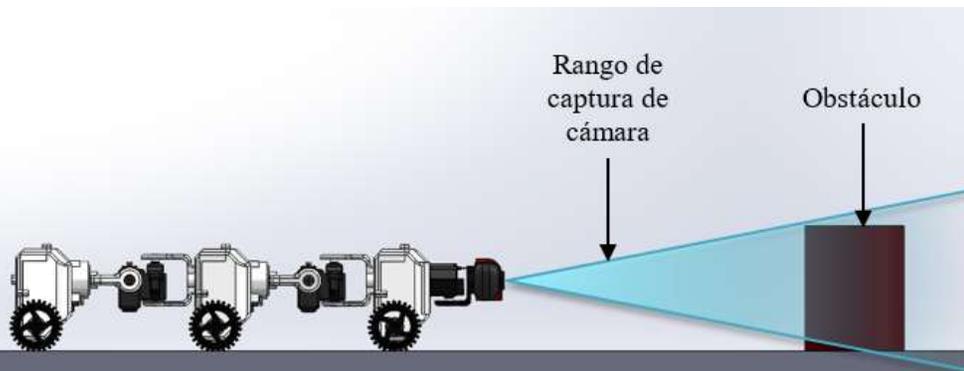


*Figura 73.* Diagrama de tipos de locomoción

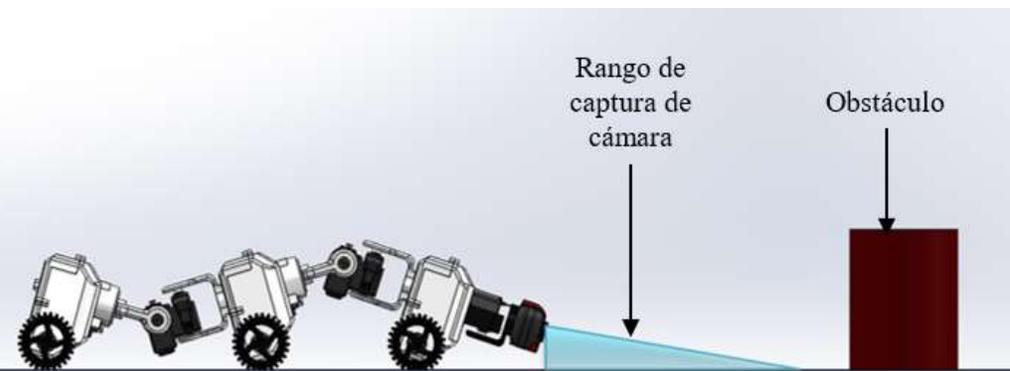
# Locomoción vertical

- Posición de captura
- Reposicionamiento de locomoción horizontal

Rango de captura de imagen en posición horizontal



Rango de captura de imagen en posición de captura



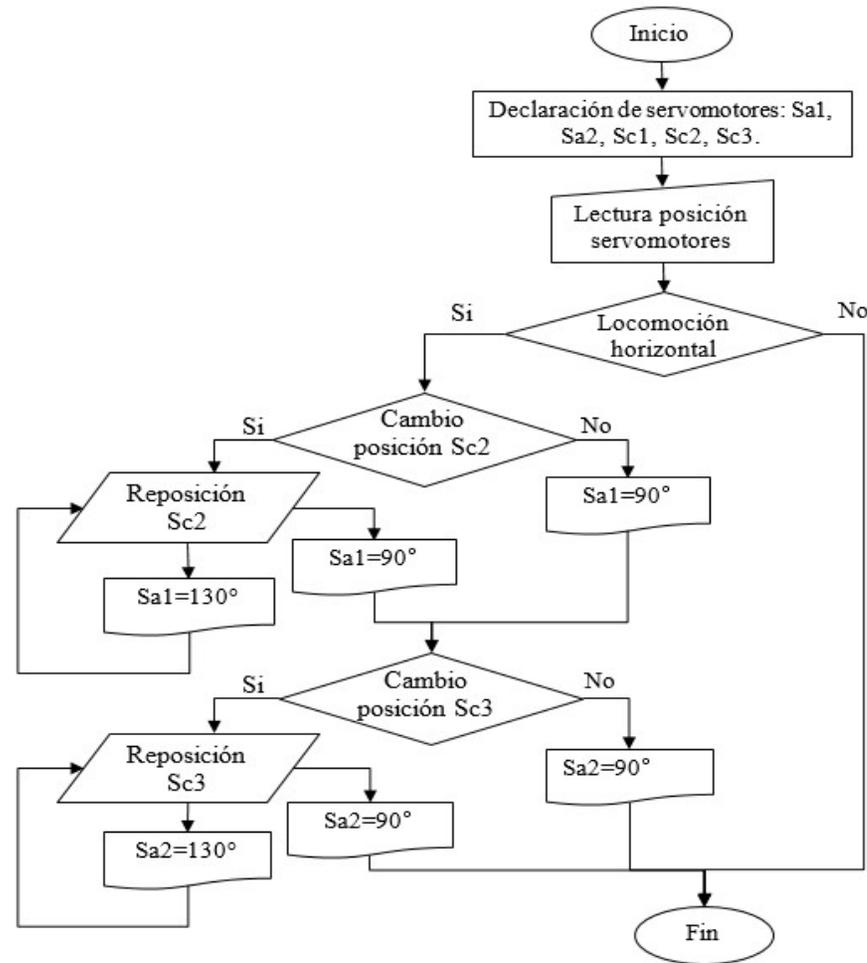
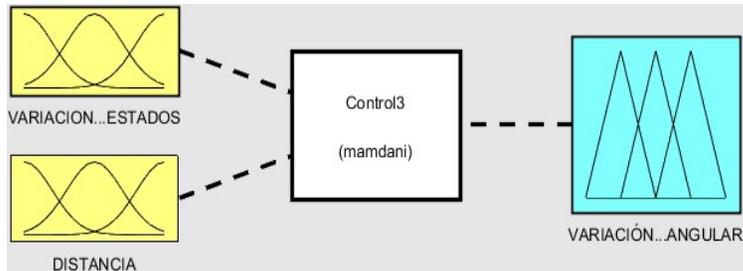
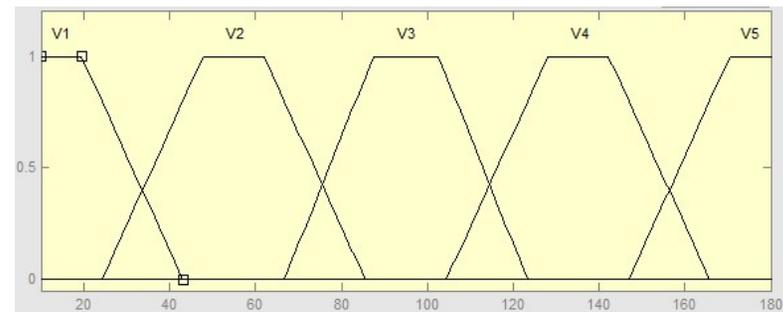


Diagrama de flujo del control de oscilación de reposicionamiento

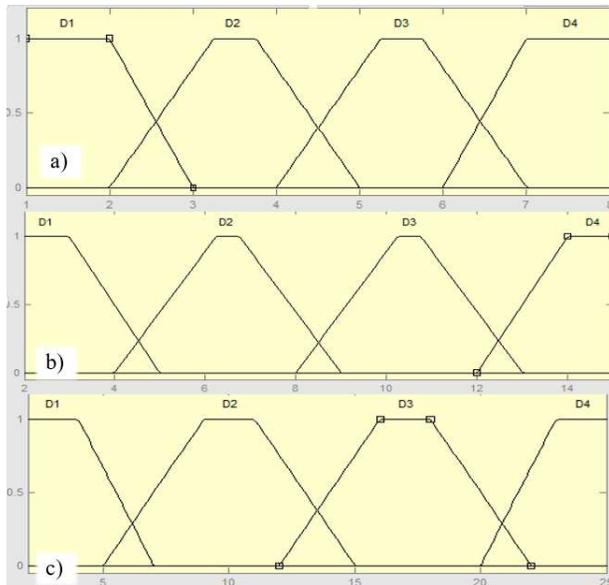
# Locomoción horizontal



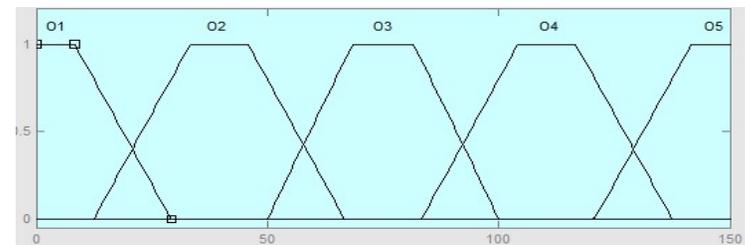
variable variación entre estados



variable distancia

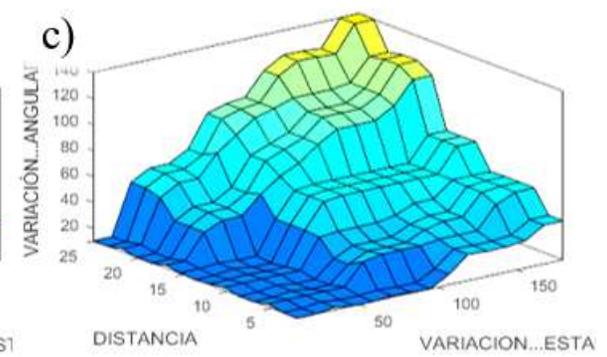
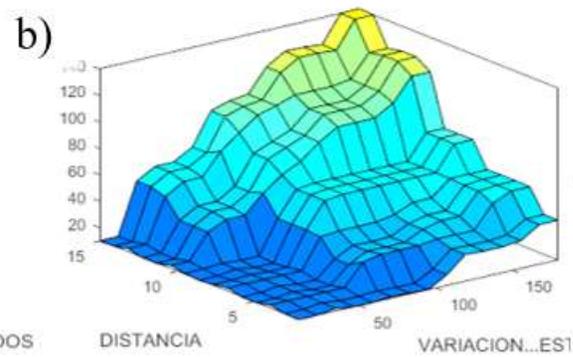
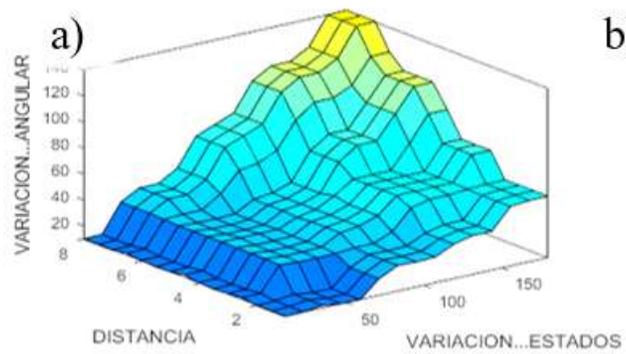


variación angular permitida



*Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción horizontal.*

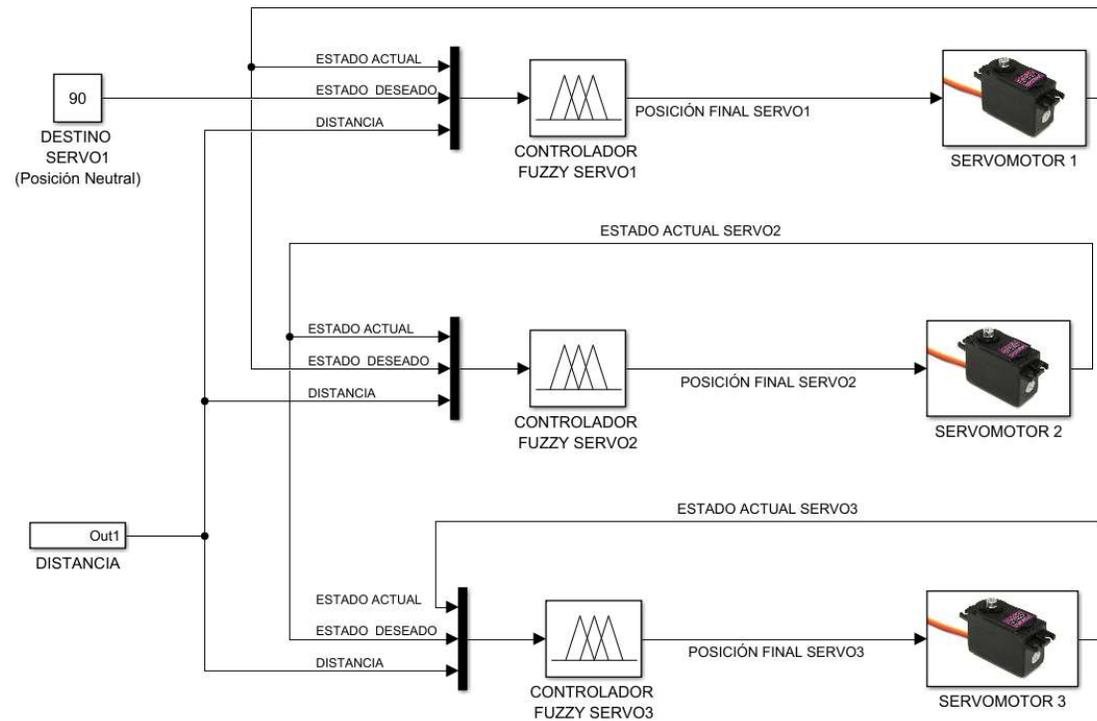
	<b>O1</b>	<b>O2</b>	<b>O3</b>	<b>O4</b>	<b>O5</b>
			D1		
V1	+	-	-	-	-
V2	+	-	-	-	-
V3	+	+	-	-	-
V4	-	+	-	-	-
V5	-	+	+	-	-
			D2		
V1	+	-	-	-	-
V2	+	+	-	-	-
V3	-	+	-	-	-
V4	-	+	+	-	-
V5	-	-	+	-	-
			D3		
V1	+	-	-	-	-
V2	+	+	-	-	-
V3	-	+	-	-	-
V4	-	-	+	-	-
V5	-	-	-	+	-
			D4		
V1	+	-	-	-	-
V2	-	+	-	-	-
V3	-	-	+	-	-
V4	-	-	-	+	-
V5	-	-	-	-	+



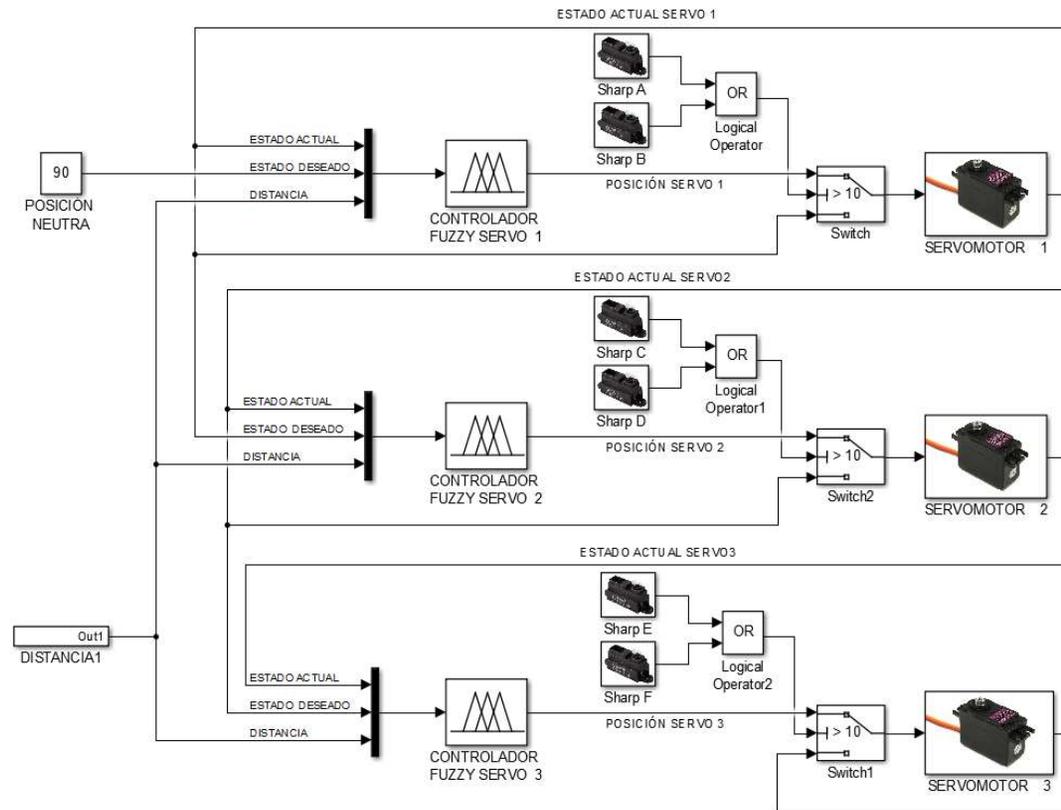
Superficies de control acción del controlador difuso: a) Sc1, b) Sc2 y c) Sc3

# Sistema de control de locomoción

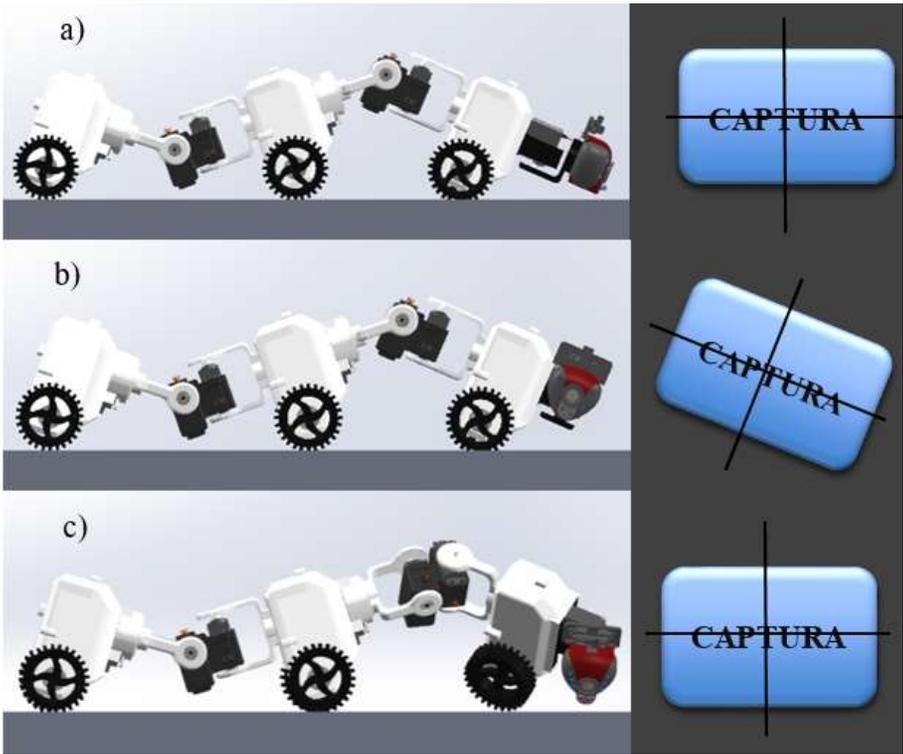
sistema de control sin restricción lateral



## Sistema de control de locomoción con restricción lateral

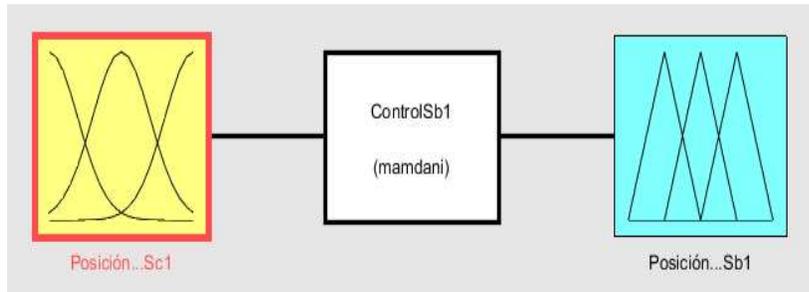


# Locomoción torsional

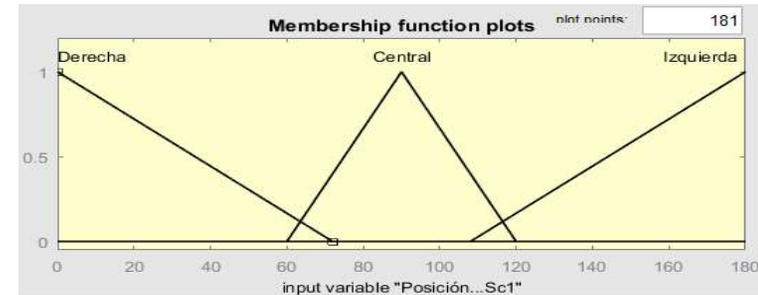


Estabilización de orientación de captura por locomoción torsional

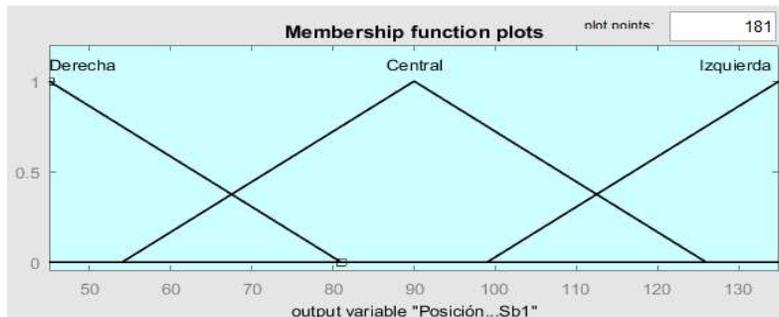
Esquema del controlador difuso para control de locomoción torsional



variable orientación de la cámara

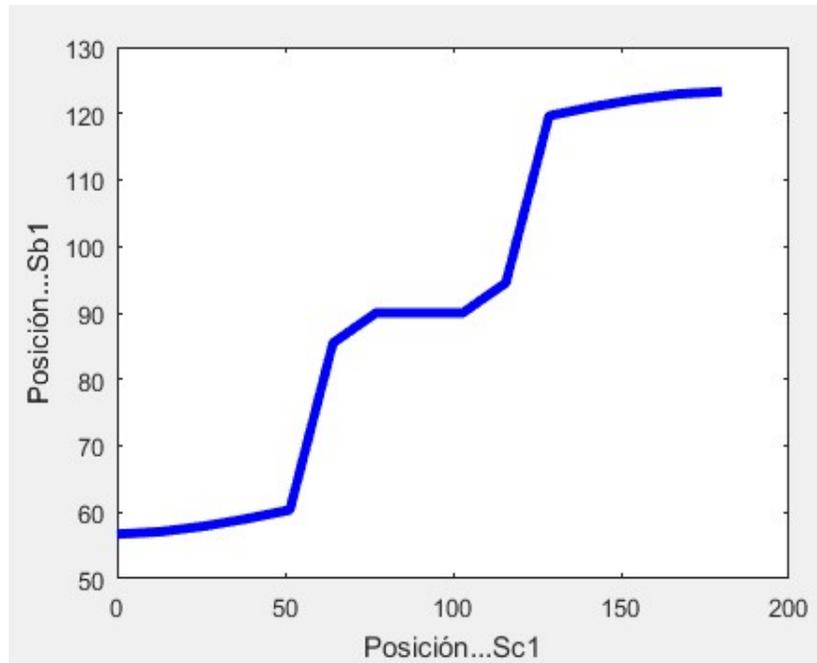


variable de salida para posición de Sb1



Matriz de asociación borrosa para controlador difuso de locomoción torsional

<b>Sb1</b> <b>Sc1</b>	Torsión Derecha	Torsión Centro	Torsión Izquierda
Captura Derecha	+	-	-
Captura centro	-	+	-
Captura Izquierda	-	-	+



*Curva de control del controlador fuzzy de locomoción torsional*

# Control del desplazamiento

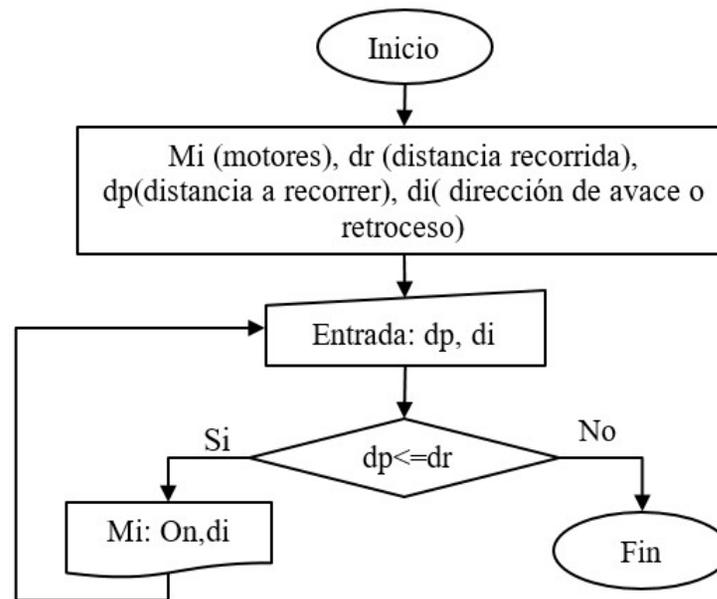
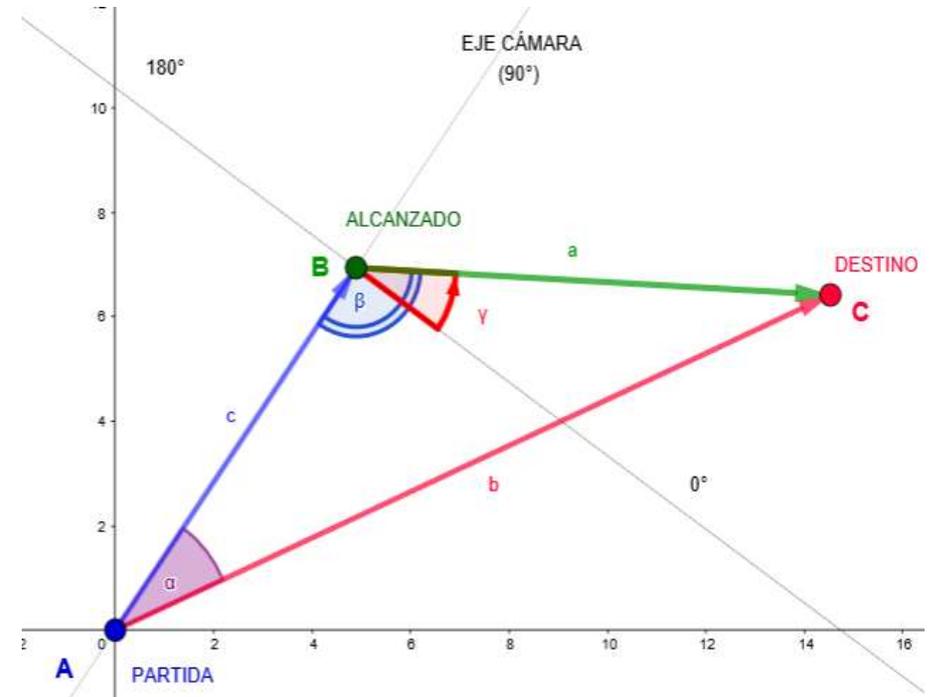
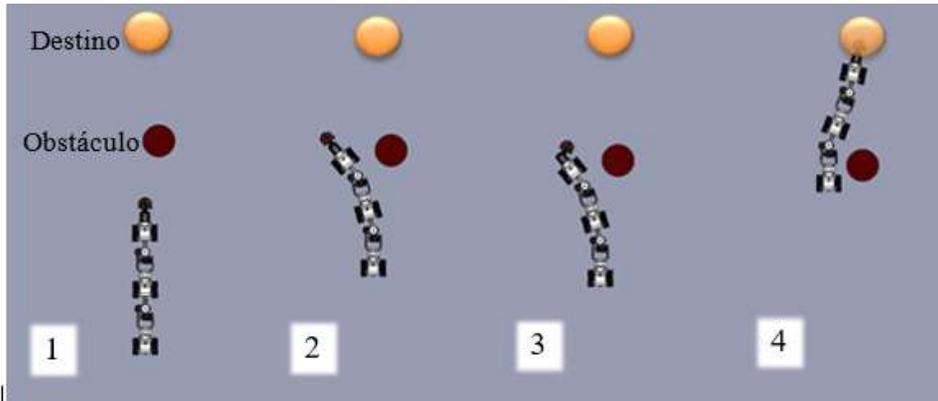
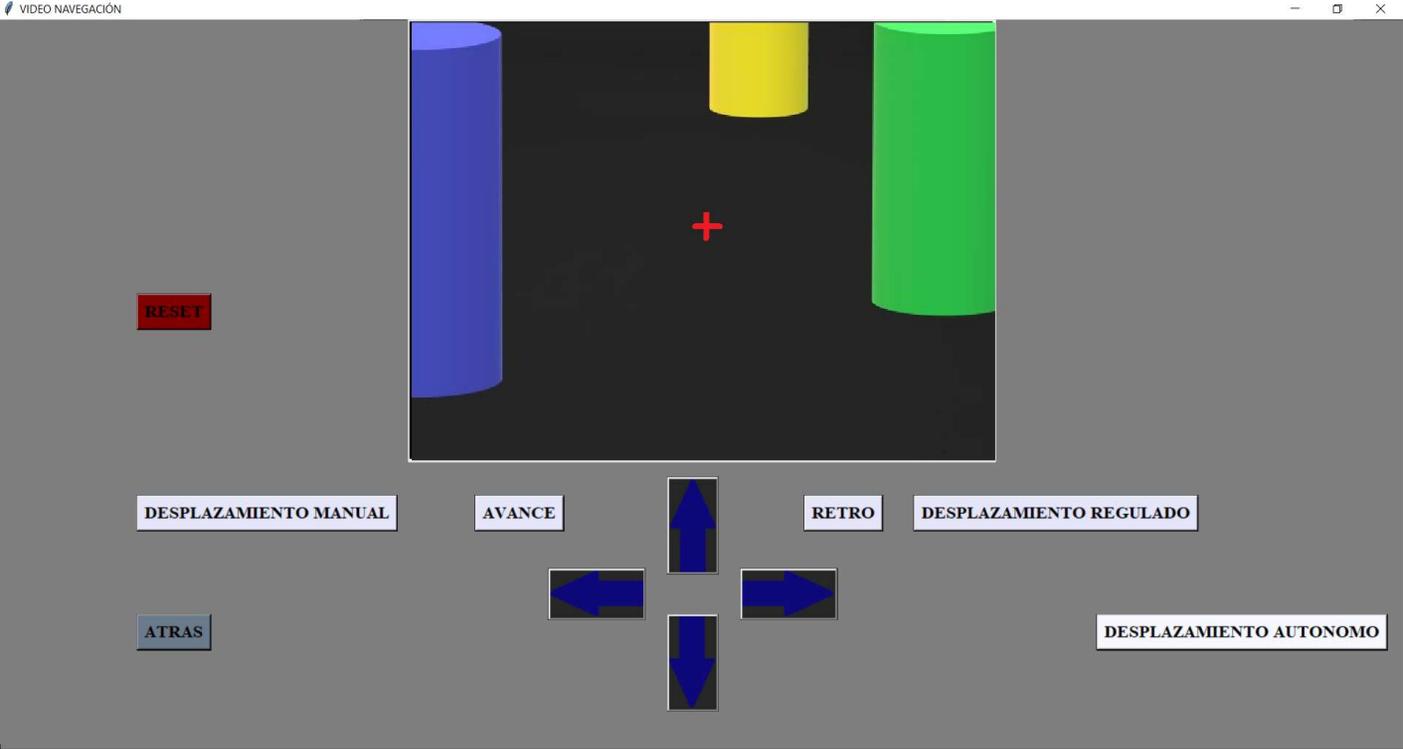


Diagrama de flujo del control “todo-nada” para el desplazamiento

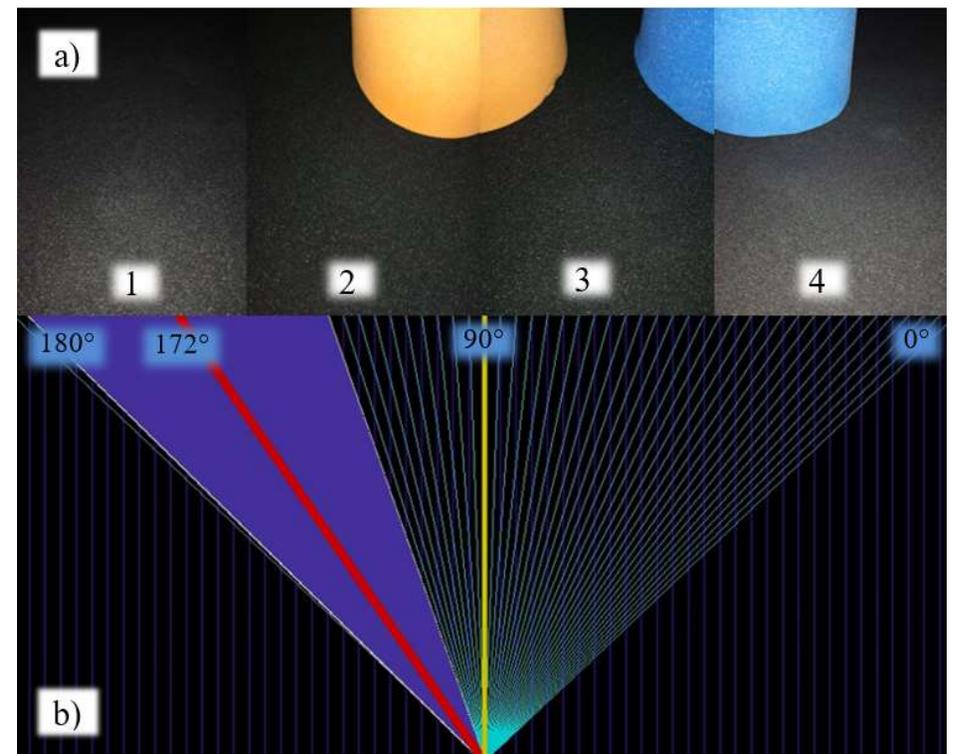
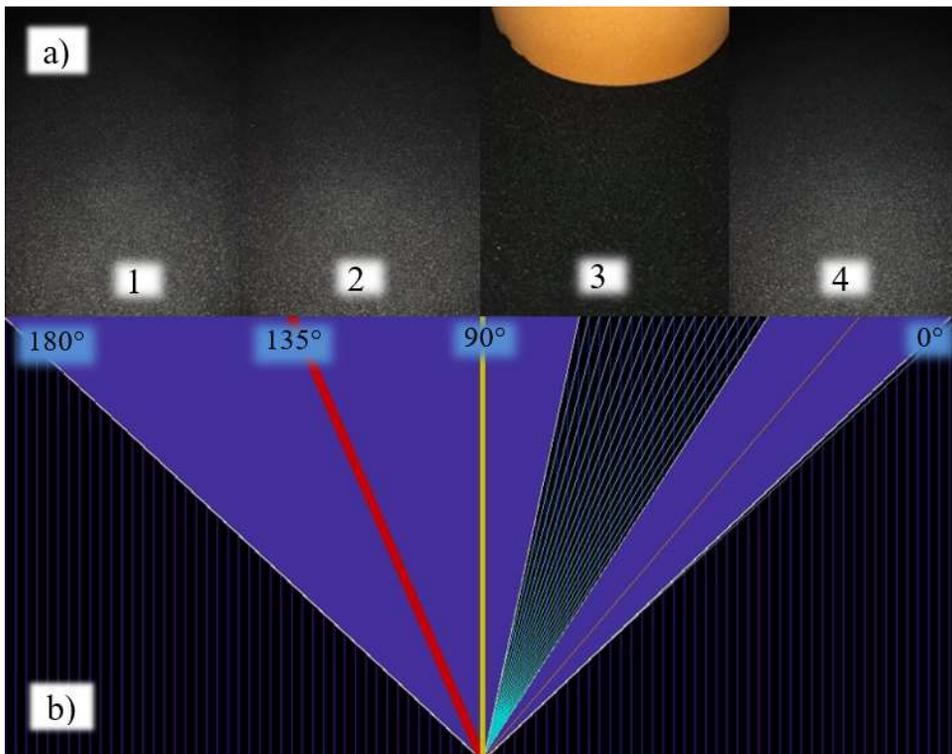
# Control de trayectoria

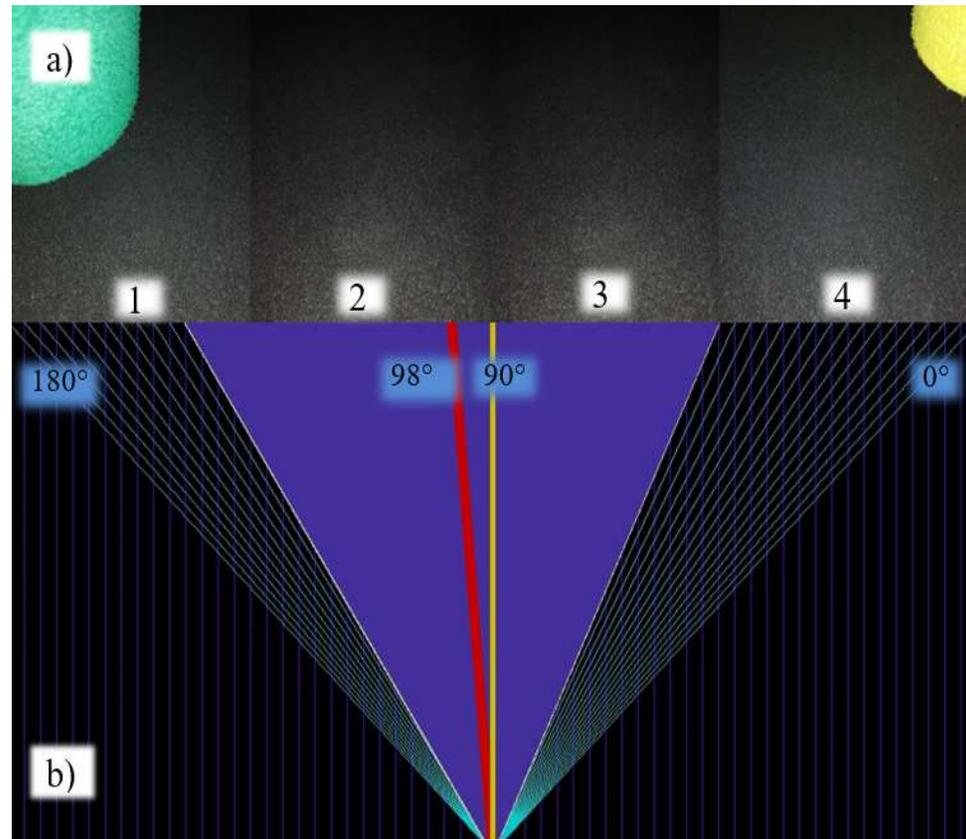
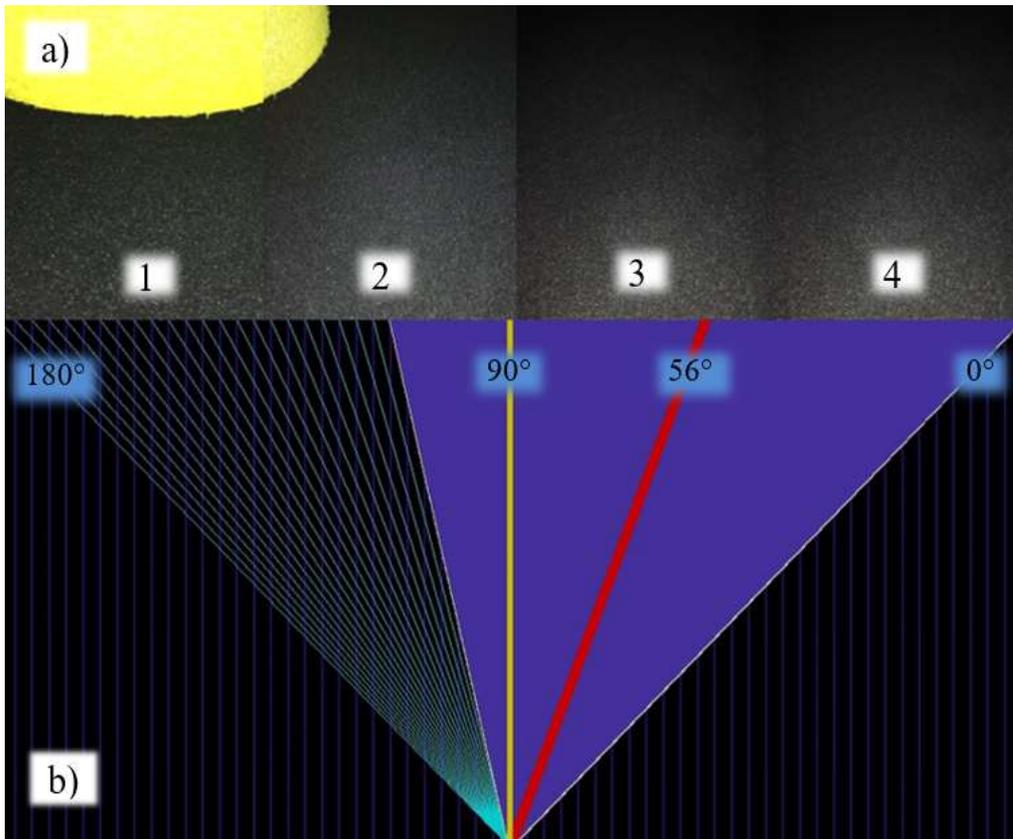


# Interface



# Resultados de análisis por visión artificial





# Resultados control de locomoción



Prueba 1 de locomoción – prueba de motricidad



Prueba 2 de locomoción – prueba de tunel



Prueba 3 de locomoción – restricción lateral

# Resultados de navegación autónoma

*Resultados de Repetibilidad y Evasión en pruebas de funcionamiento*

<b>Destino</b>	<b>Repetibilidad</b> [cm]	<b>Aceptación</b> Repetibilidad	<b>Evasión</b> Obstáculo
1	2.20	1.0	0.43
2	4.00	1.0	0.71
3	1.90	1.0	0.43
4	2.99	1.0	0.71
5	2.85	1.0	0.71
6	3.58	1.0	0.71

$$Evasión Promedio = \frac{\sum_{i=1}^n Evasión_i}{n} = 61.90\%$$