

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

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

**“DESARROLLO DE UN ENTORNO REALISTA DEL TEATRO
ROBÓTICO BASADO EN EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
NUEVAS FUNCIONES DE LOS ROBOTS NAO’S, Y UNA
ESCENOGRAFÍA MECATRÓNICA”**

AUTORES:

Armendáriz Castillo, Dalton Napoleón

Quilumbango Escobar, Nicolas Javier

DIRECTOR:

Ing. Tobar Quevedo, Johanna Belén PhD.

2023





Punto de Partida

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

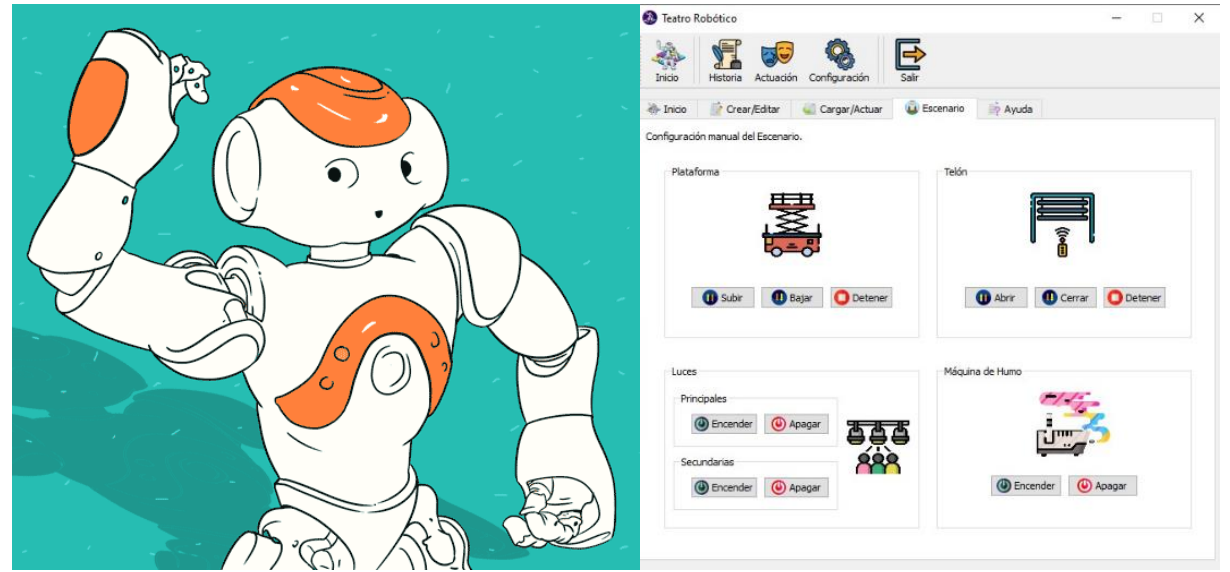
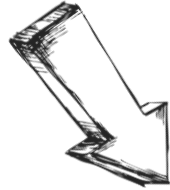
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

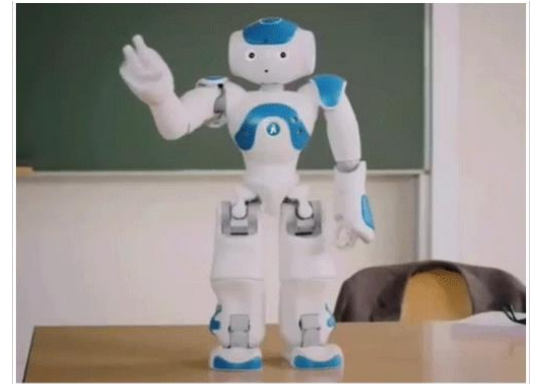
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



¿Por qué comenzamos?



¿Donde queremos llegar?



Objetivos

❖ Un entorno realista al teatro robótico

Antecedentes y Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Nuevas Tareas Nao's



Mecanismo de proyección





Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

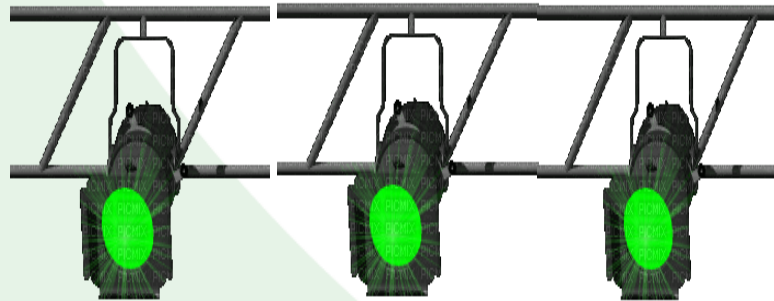
Recomendaciones

Trabajos futuros

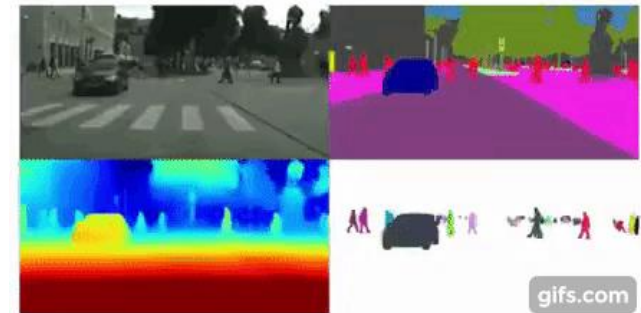
Objetivos

❖ Un entorno realista al teatro robótico

Mecanismo de iluminación



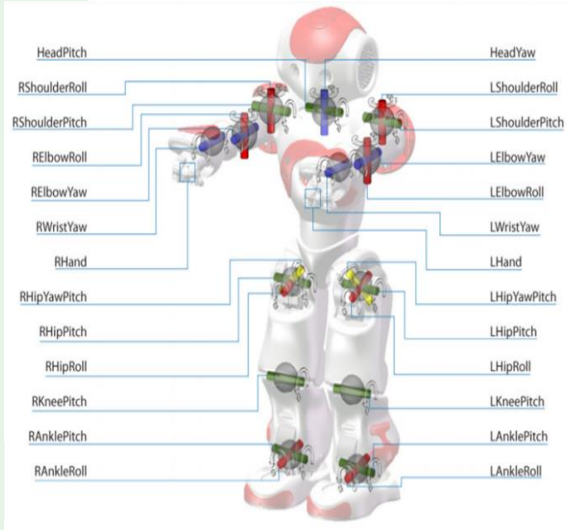
Visión Artificial



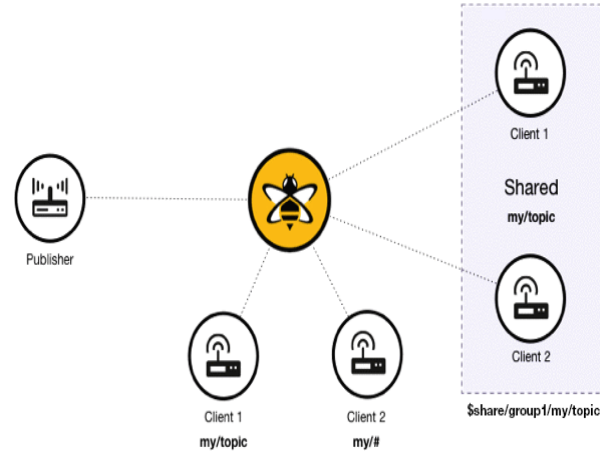


Marco Conceptual

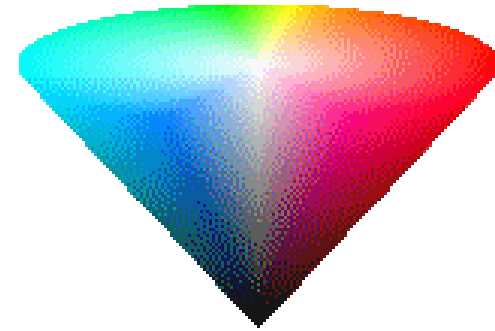
- Robot Nao



- Protocolo MQTT



- Modelo HSV



- Procesamiento de Imágenes



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

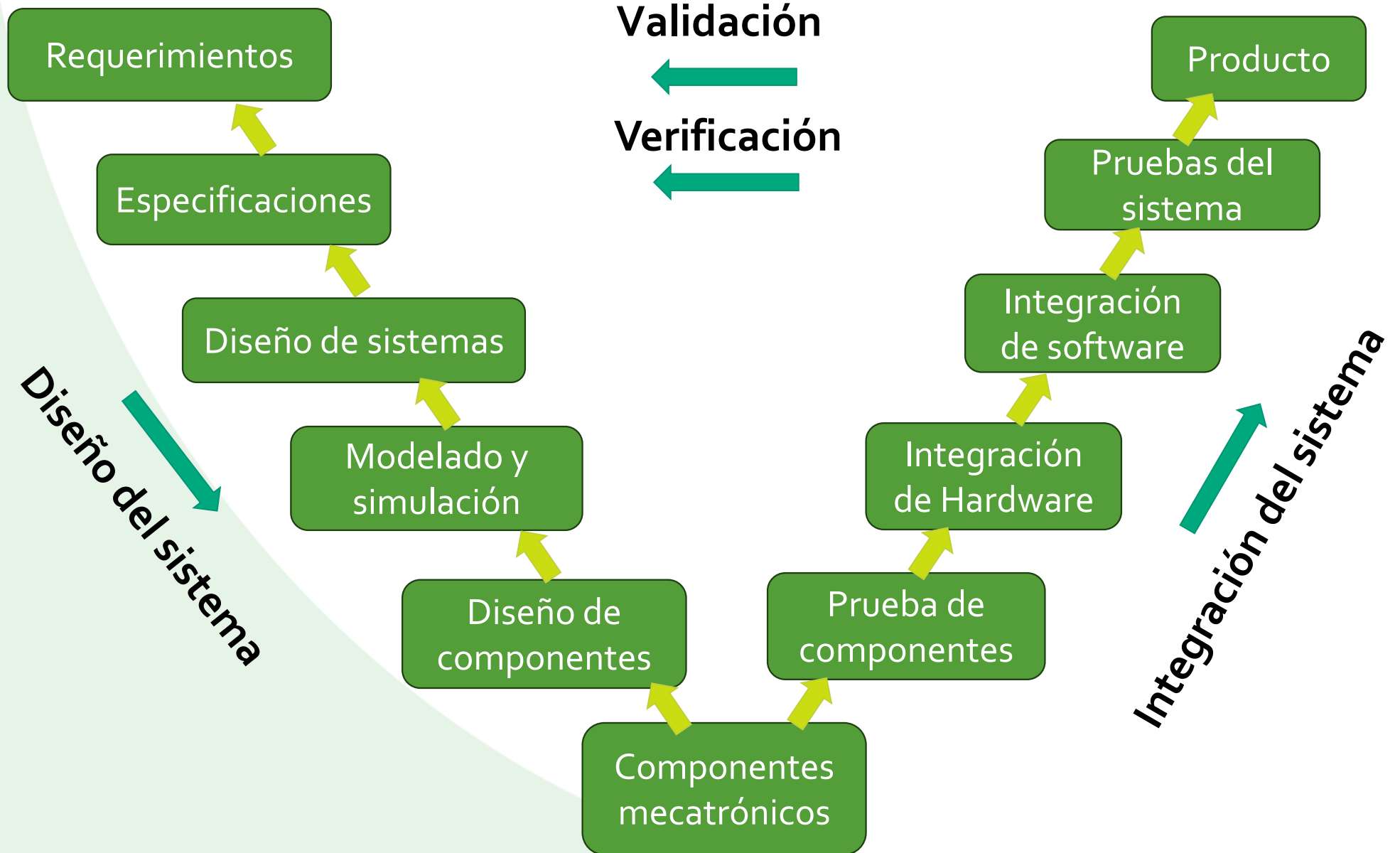
Recomendaciones

Trabajos futuros



Metodología

- Norma VDI 2206



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

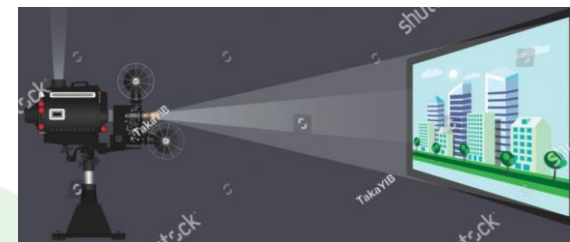
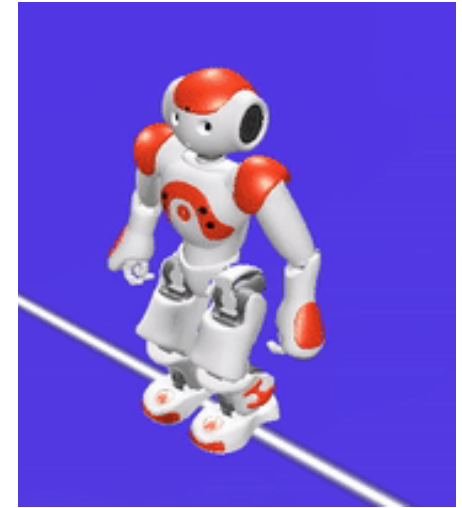
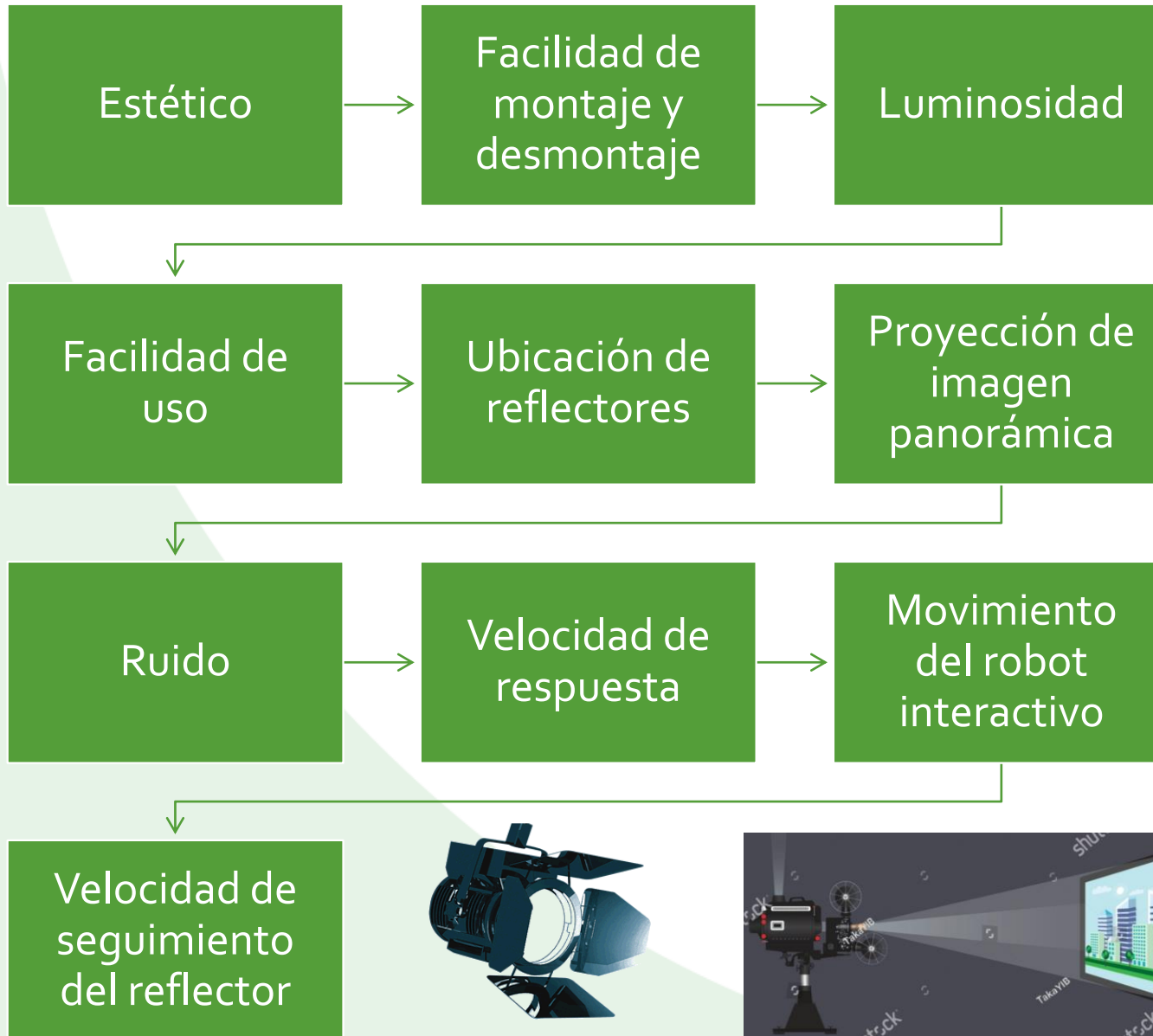
Recomendaciones

Trabajos futuros



Requerimientos

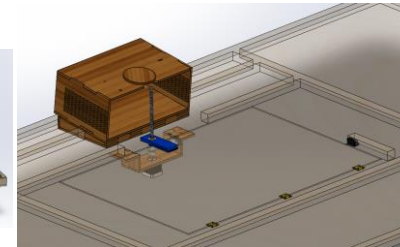
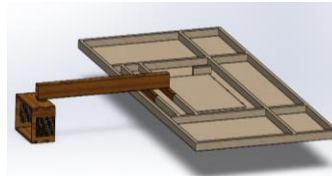
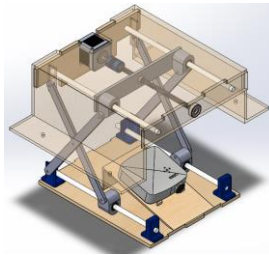
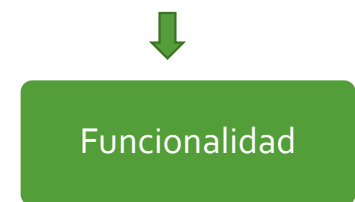
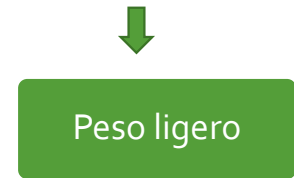
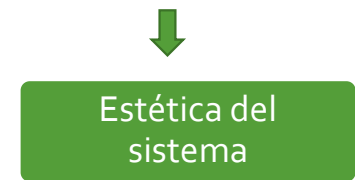
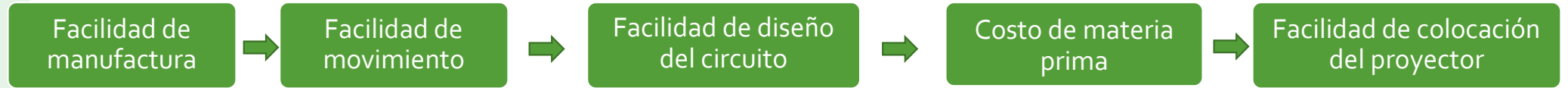
- **Necesidades**





Modelado CAD del mecanismo de proyección

• Matriz de evaluación de conceptos



Conceptos	A (Referencia) Mecanismo tipo tijera	B Armazón en voladizo	C Mecanismo elevador de tornillo
Criterios de selección	Calificación Evaluación ponderada	Calificación Evaluación ponderada	Calificación Evaluación ponderada
Total	2.35	2.2	3.05
Lugar	2	3	1
¿Continuar?	No	No	Si

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Cálculo de los subsistemas

Mecanismo de Proyección



$$F = 0.85 \text{ kg} * 9.8 \frac{m}{s^2} = 8.33 \text{ N} = \mathbf{0.00833 \text{ kN}}$$

$$m = 820 \frac{kg}{m^3} * (0.7m * 0.495m * 0.003m) = \mathbf{0.85 \text{ kg}}$$

Datos	Valor
Diámetro (d)	8 mm
Paso (p)	2 mm
Número de hilos (n)	4 hilos
Avance (l)	8 mm
Longitud (L)	200 mm
Coefficiente de fricción (f)	0.06 en operación
Coefficiente de fricción del collarín (f_c)	0.06 en operación
Diámetro medio del collarín (d_c)	16 mm
Aceleración (a)	9.8 m/s ²
Ángulo de la rosca (α)	14.5°
Diámetro menor (d_r)	7 mm
Diámetro medio (d_m)	7.5 mm

• Par de Torsión

$$T_c = \frac{F f_c d_c}{2} = \frac{0.00833 * 0.06 * 16}{2} = \mathbf{3.99 \text{ N.mm}}$$

• Esfuerzo cortante de torsión del tornillo

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_r^3} = \frac{16 * 3.99 \text{ Nmm}}{\pi (7 \text{ mm})^3} = \mathbf{0.0592 \text{ MPa}}$$

• Esfuerzo axial del tornillo

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_r^2} = \frac{4 * 8.33 \text{ N}}{\pi * (7 \text{ mm})^2} = \mathbf{0.216 \text{ MPa}}$$

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Cálculo de los subsistemas

Mecanismo de Proyección

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

- **Fuerza para elevar la carga**

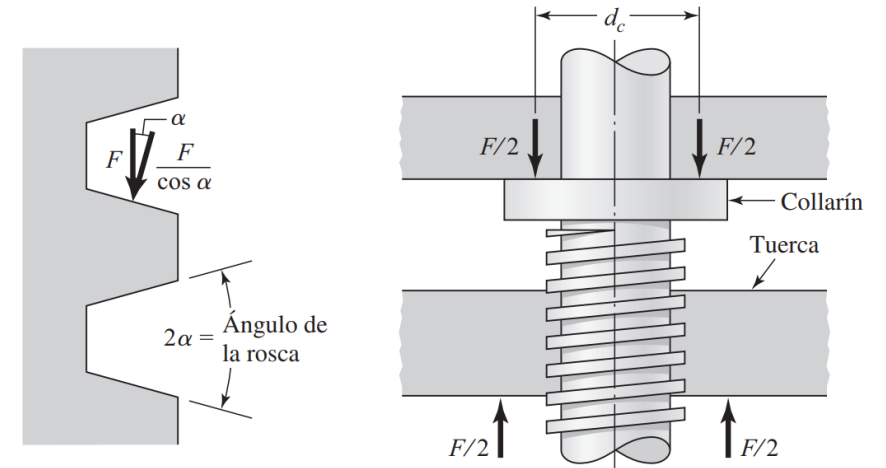
$$P_R = \frac{F \left[\left(\frac{l}{\pi d_m} \right) + f \sec(\alpha) \right]}{1 - \left(\frac{l f \sec(\alpha)}{\pi d_m} \right)} = \frac{0.00833 * \left[\left(\frac{8}{7.5\pi} \right) + 0.06 * \sec(14.5) \right]}{1 - \left(\frac{8 * 0.06 * \sec(14.5)}{\pi * 7.5} \right)} = 3.42 \text{ N}$$

- **Fuerza para bajar la carga**

$$P_L = \frac{F \left[f \sec(\alpha) - \left(\frac{l}{\pi d_m} \right) \right]}{1 + \left(\frac{l f \sec(\alpha)}{\pi d_m} \right)} = \frac{0.00833 \left[0.06 * \sec(14.5) - \left(\frac{8}{7.5\pi} \right) \right]}{1 + \left(\frac{8 * 0.06 * \sec(14.5)}{7.5\pi} \right)} = -2.26 \text{ N}$$

- **Eficiencia**

$$e = \frac{T_0}{T_R} = \frac{Fl}{2\pi T_R} = \frac{8.33\text{N} * 0.008\text{m}}{2\pi * 0.0128\text{Nm}} = 0.8286 * 100 = 82.86\%$$





Modelado CAD del reflector de seguimiento

- Matriz de evaluación de conceptos

Conceptos		A (Referencia) Reflectores de seguimiento con Luz RGB		B Reflectores de seguimiento con neblineros blancos		C Reflectores de seguimiento con neblineros blancos y carcasa	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Criterios de selección	Peso						
Facilidad de manufactura	10%	3	0.30	3	0.3	2	0.2
Facilidad de giro	15%	3	0.45	3	0.45	3	0.45
Facilidad de diseño del circuito de control	5%	3	0.15	3	0.15	3	0.15
Costo de materia prima	5%	4	0.20	4	0.2	3	0.15
Estética	10%	1	0.1	3	0.3	5	0.5
Facilidad de programación	5%	3	0.15	3	0.15	3	0.15
Iluminación	20%	3	0.6	4	0.8	5	1
Precisión de posicionamiento	10%	3	0.3	4	0.4	4	0.4
Peso ligero	5%	3	0.15	4	0.2	3	0.15
Resistencia	15%	3	0.45	3	0.45	5	0.75
Total			2.85		3.4		3.9
Lugar			3		2		1
¿Continuar?			No		No		Si

Facilidad de Giro



Resistencia



Peso



Manufactura



Iluminación



Estética



Costo de materia prima

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

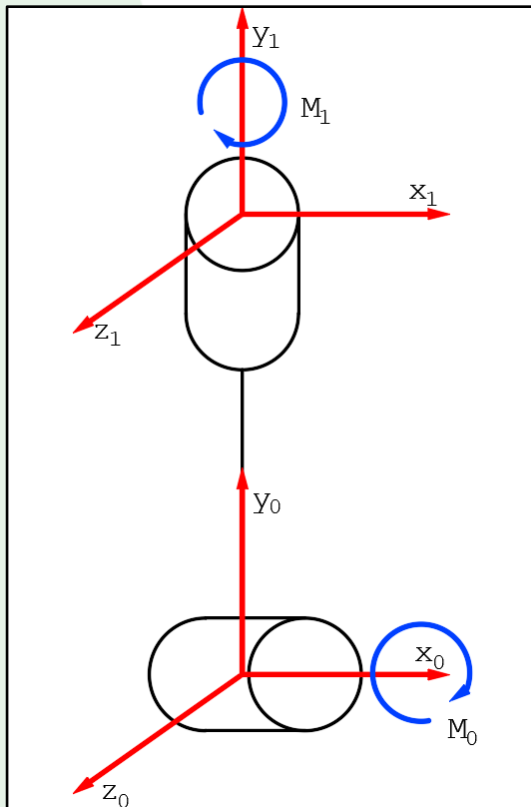
Trabajos futuros



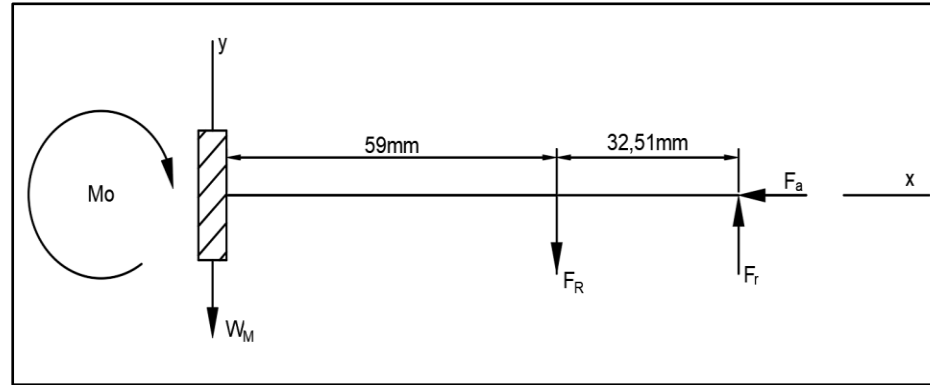
Cálculo matemático de los subsistemas

- Reflectores de Seguimiento

- Diagrama R-R



- DCL del reflector $x_0 - y_0$



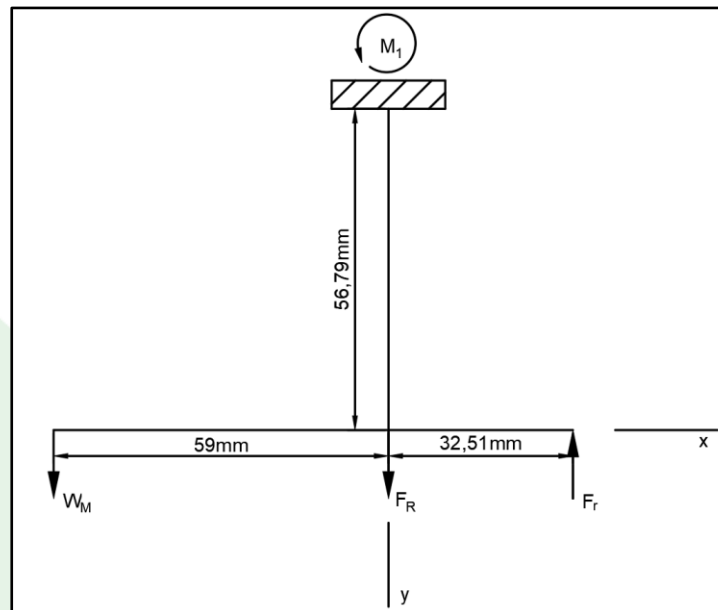
- Fuerza del reflector

$$F_R = m * a = 0.097kg * 9.8 \frac{m}{s^2} = 0.95 N$$

- Torque

$$T_M = F_R * d = 0.95N * 0.059m = 0.056 Nm$$

- DCL de la base $x_1 - y_1$



- Fuerza radial y axial

$$F_r = 0.95N + \left(0.055kg * 9.8 \frac{m}{s^2}\right) = 1.489 N \quad F_a = 0 N$$

- Momento total

$$M_o = 0.95N(0.059m) + 1.489N(0.09151m) = 0.192 Nm$$

- Torque

$$M_1 = 0.08 Nm$$

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



ECUADOR

Selección del material de construcción

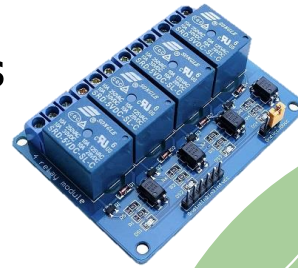




ECUADOR

Selección del material de construcción

Módulo
de 4 relés



MDF
6mm



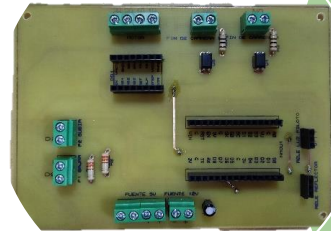
Canaleta
de 25x25



Tablero de control



PCB



Fuente de
Poder 5vDC y
12VDC



Luz piloto
verde



Ventilador
de 1,08 W



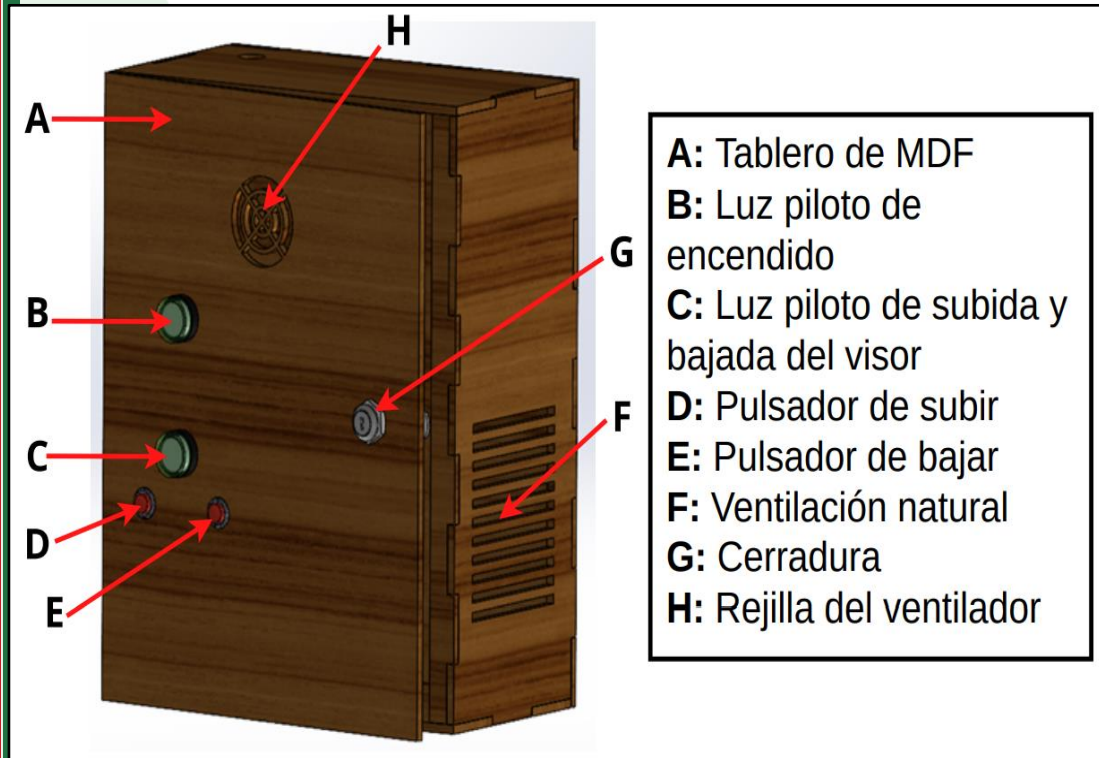
Pulsador
rojo



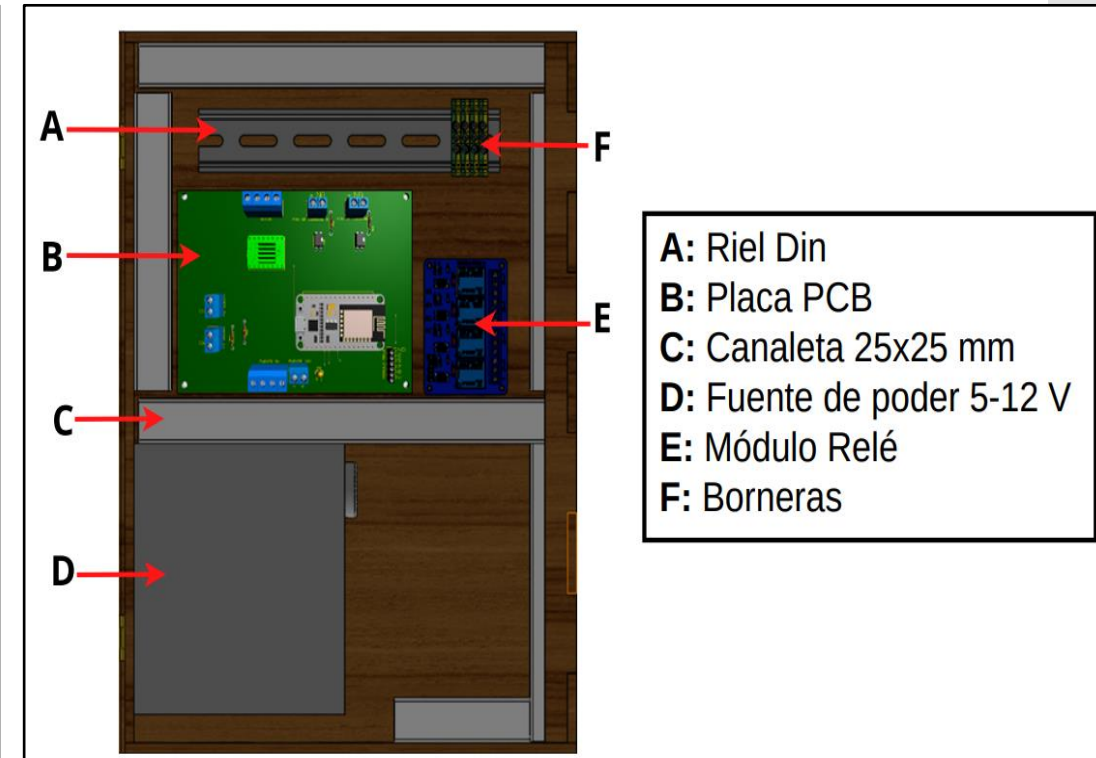


Modelado CAD del tablero de control

- Partes externas del tablero



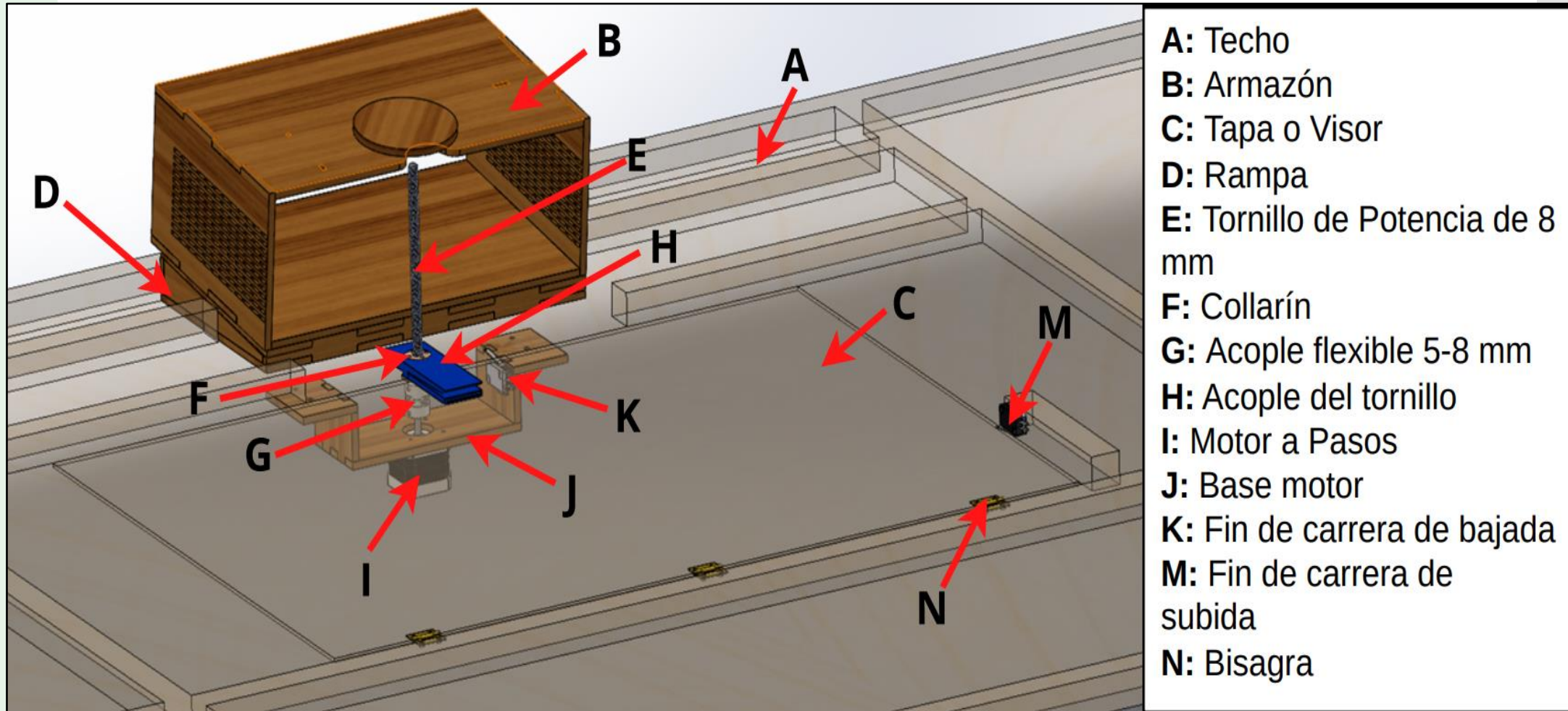
- Partes internas del tablero





Modelado CAD del mecanismo de proyección

- Partes del diseño CAD



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Modelado CAD del mecanismo de proyección

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

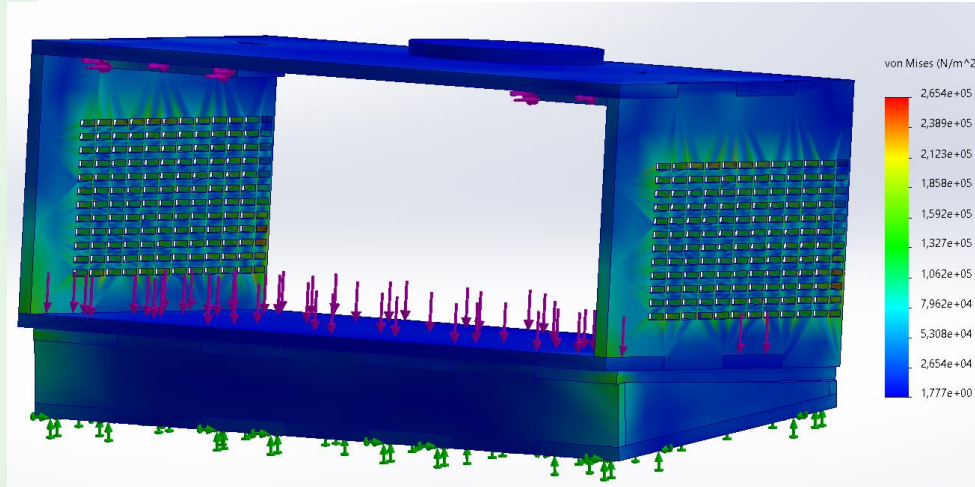
Conclusiones

Recomendaciones

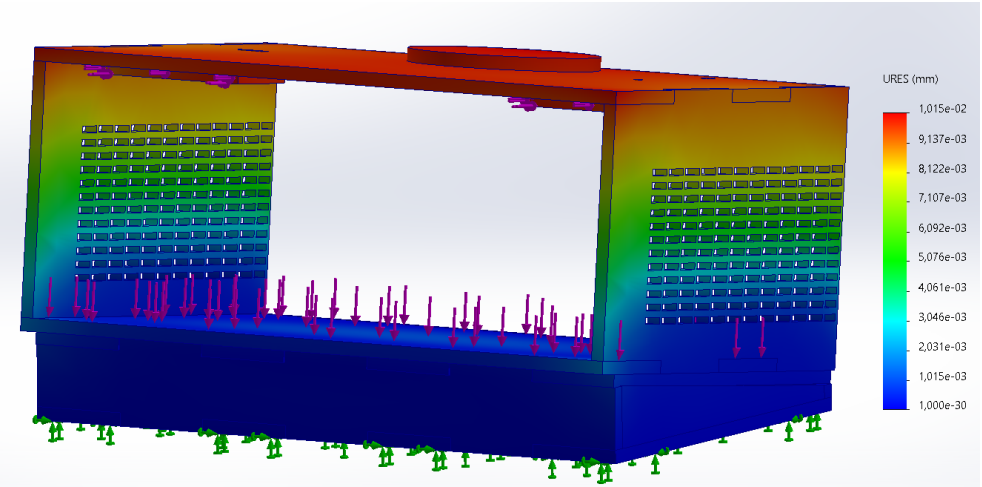
Trabajos futuros

- **Análisis estático del armazón**

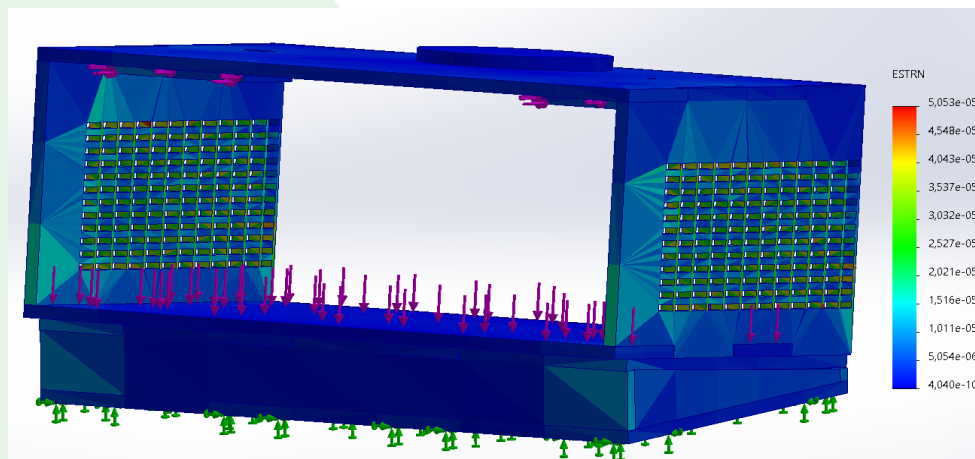
- Esfuerzo de Von Mises



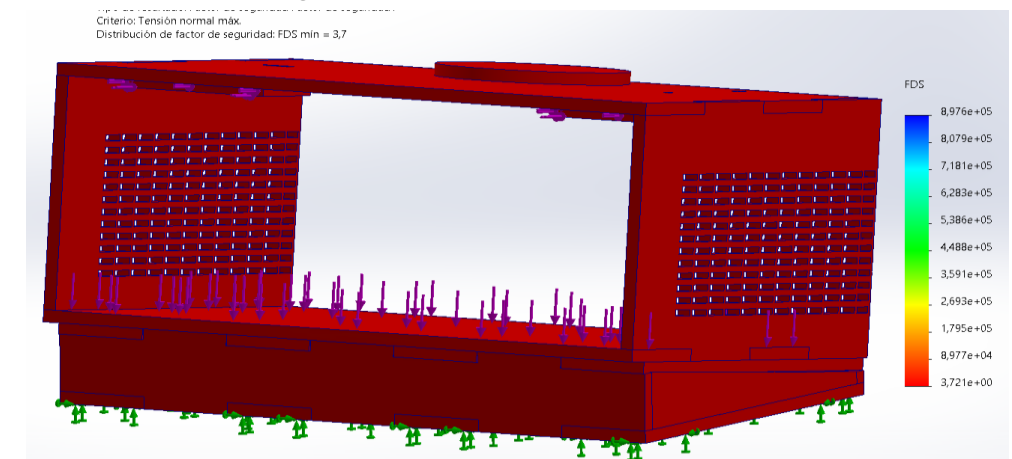
- Desplazamientos



- Deformaciones unitarias



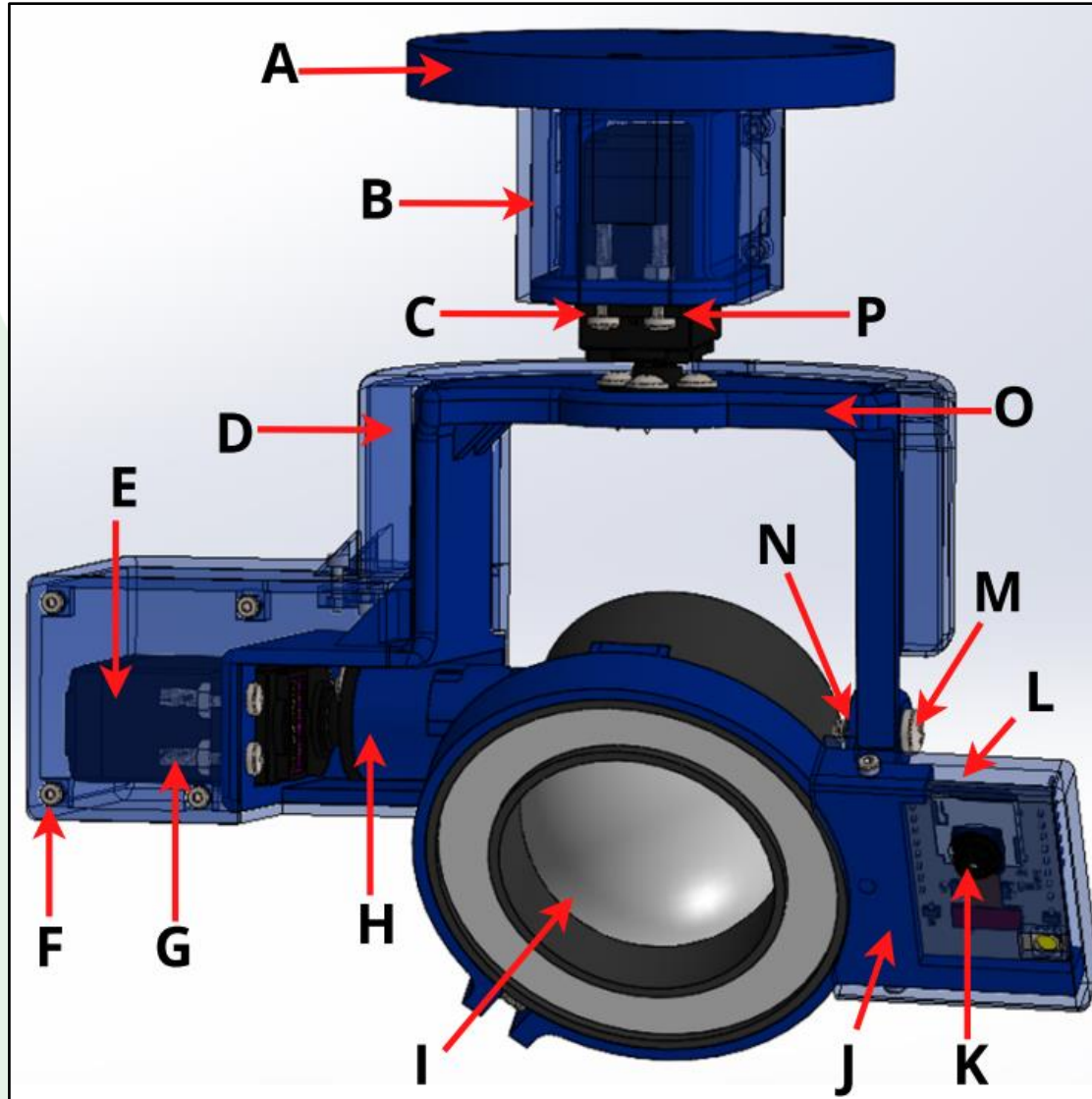
- Factor de seguridad





Modelado CAD del reflector de seguimiento

- Partes del diseño CAD



- A: Acople Base
- B: Carcasa Base
- C, G: Tornillo M3
- D: Carcasa acople reflector
- E, P: Servomotor
- F: Tornillo M2
- H: Acople tipo matrimonio
- I: Luz Reflectora
- J: Acople cámara
- K: Cámara (Esp32-cam)
- M: Tornillo M4
- N: Rodamiento U624ZZ
- O: Acople Reflector

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

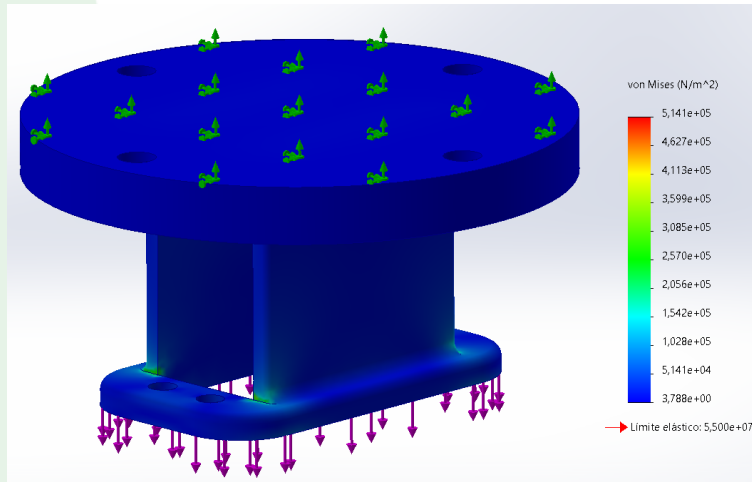
Trabajos futuros



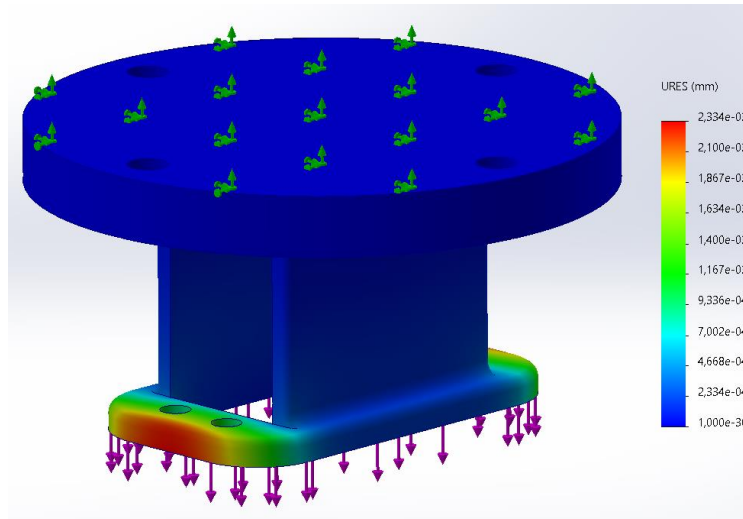
Modelado CAD del reflector de seguimiento

- **Análisis estático de la base del reflector**

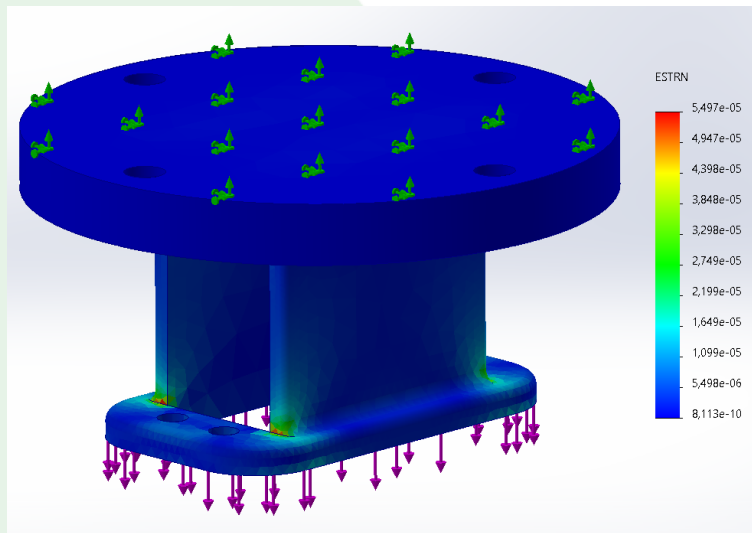
- Esfuerzo de Von Mises



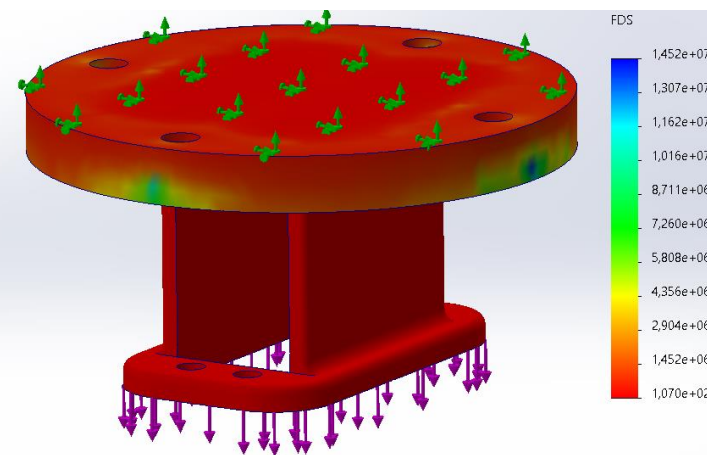
- Desplazamientos



- Deformaciones unitarias



- Factor de seguridad



Elemento	Peso [kg]
Servomotores	0.11
Carcasa base 1	0.01493
Carcasa base 2	0.00592
Carcasa reflector 1	0.01458
Carcasa reflector 2	0.03142
Carcasa reflector 3	0.00567
Base reflector	0.05104
Matrimonio	0.00809
Acople cámara	0.01083
Tapa esp32-cam	0.00718
Esp32-cam	0.02
Reflector	0.097
Rodamiento	0.000479
Total	0.377139

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

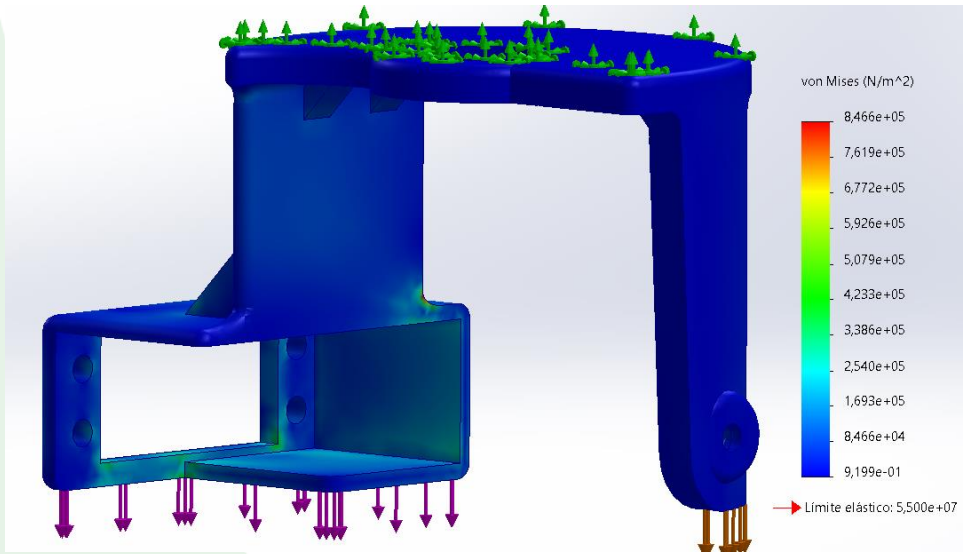
Recomendaciones

Trabajos futuros

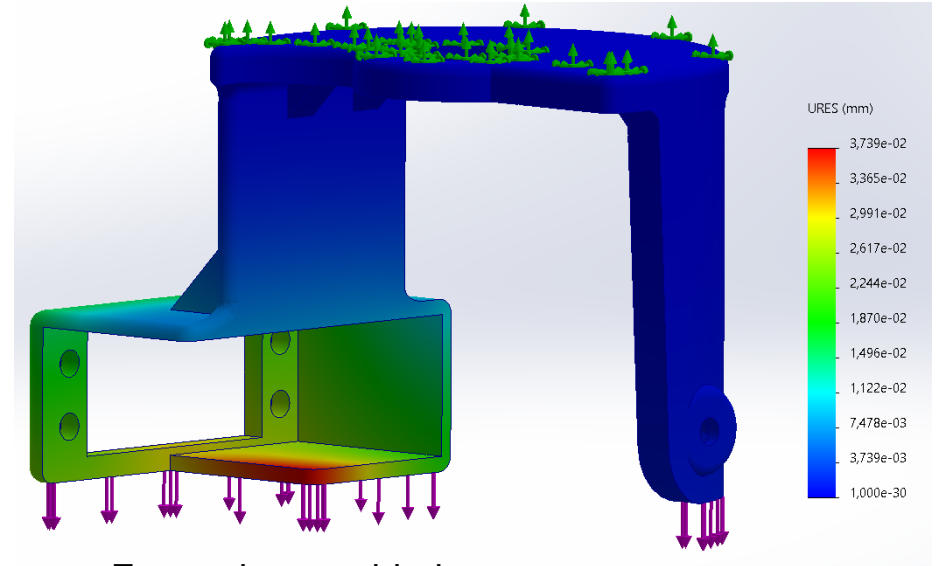


Modelado CAD del reflector de seguimiento

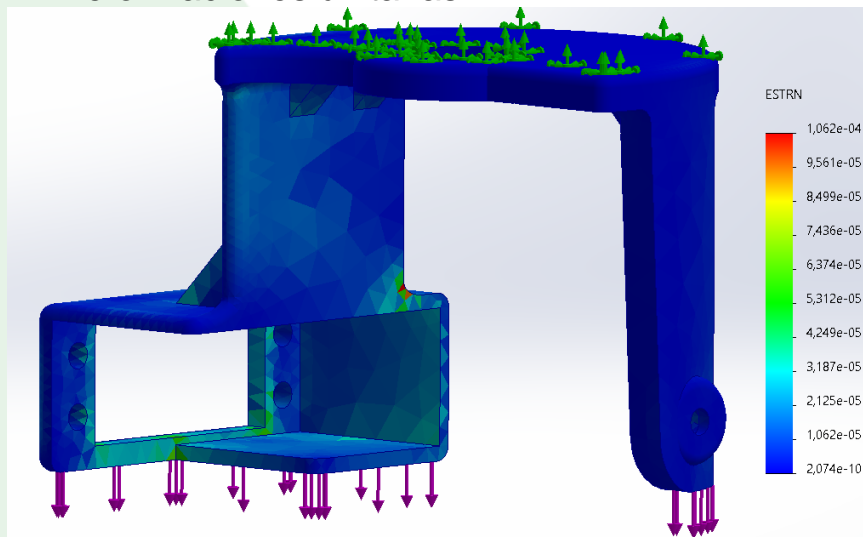
- **Análisis estático del acople de la luz reflectora**
 - Esfuerzo de Von Mises



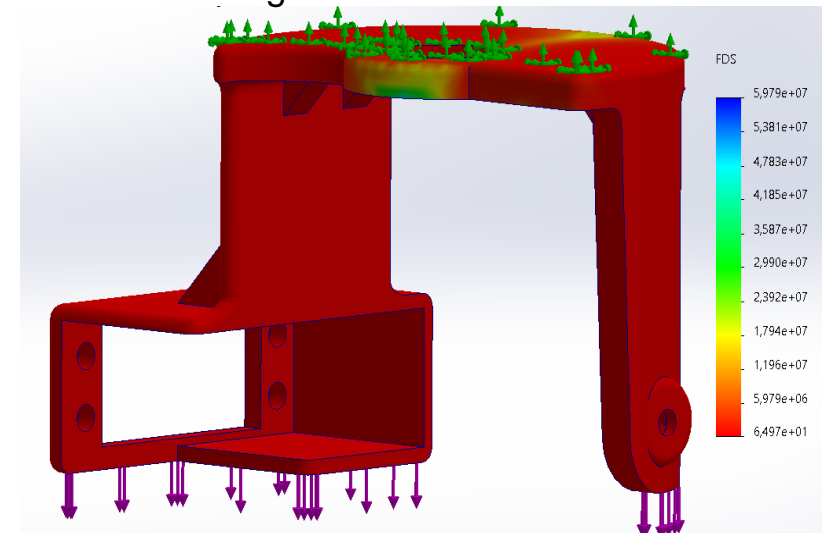
- Desplazamientos



- Deformaciones unitarias



- Factor de seguridad



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

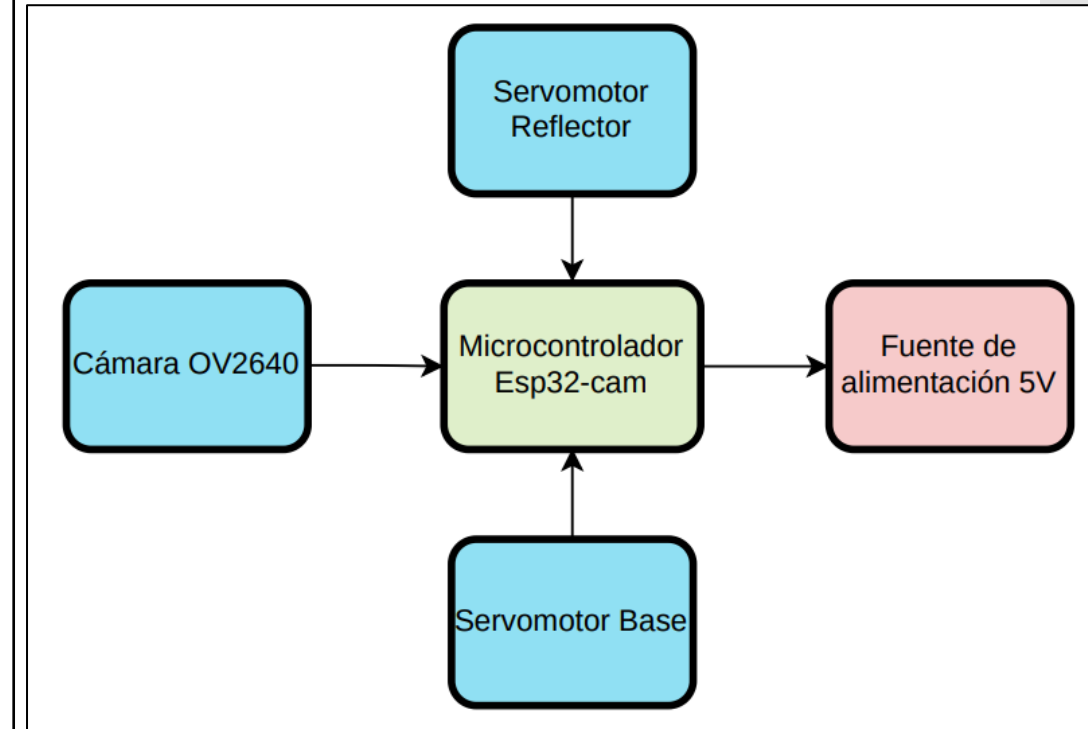
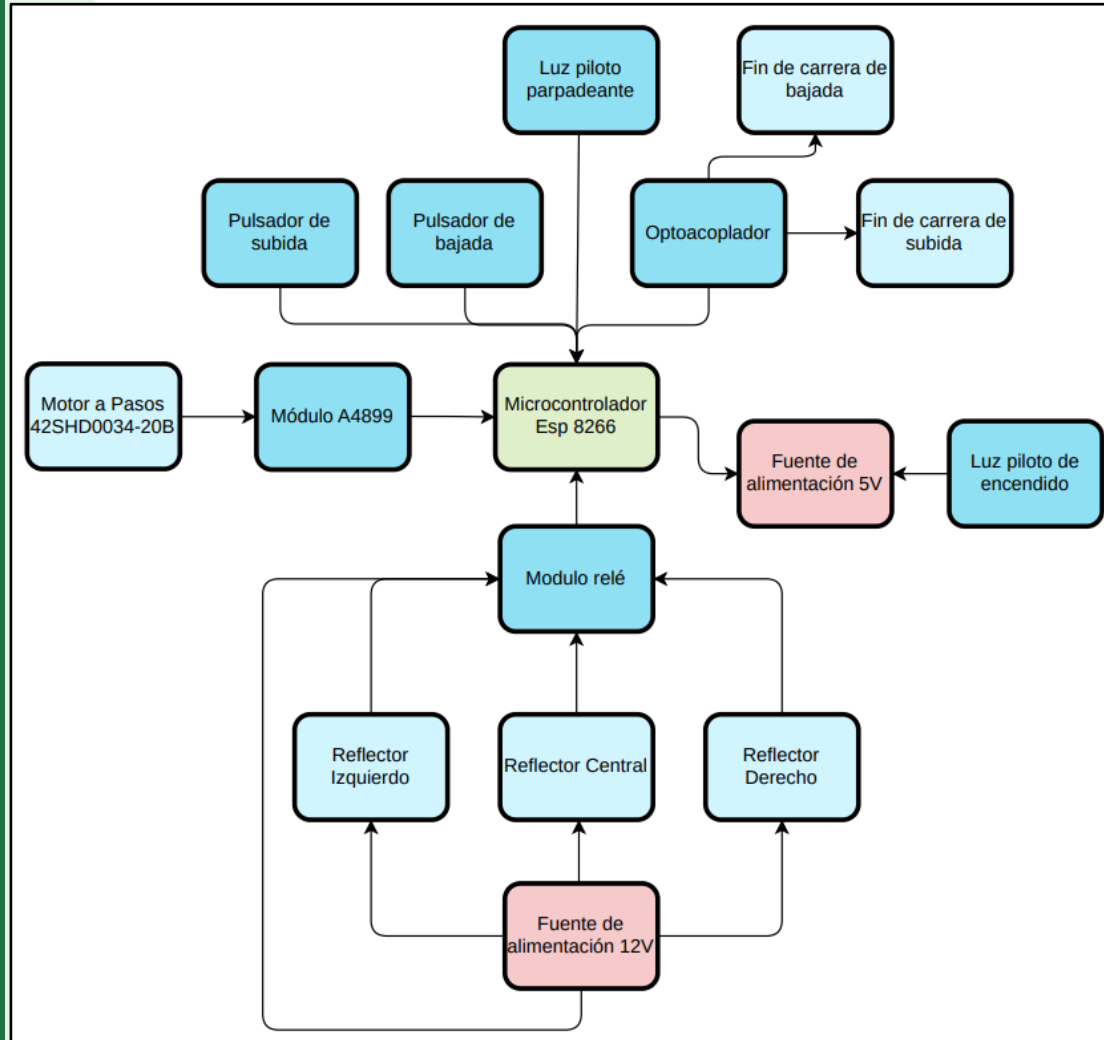
Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño Electrónico

- Diagrama de control de proyección y luces reflectoras
- Diagrama de conexión del reflector de seguimiento



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño Electrónico

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

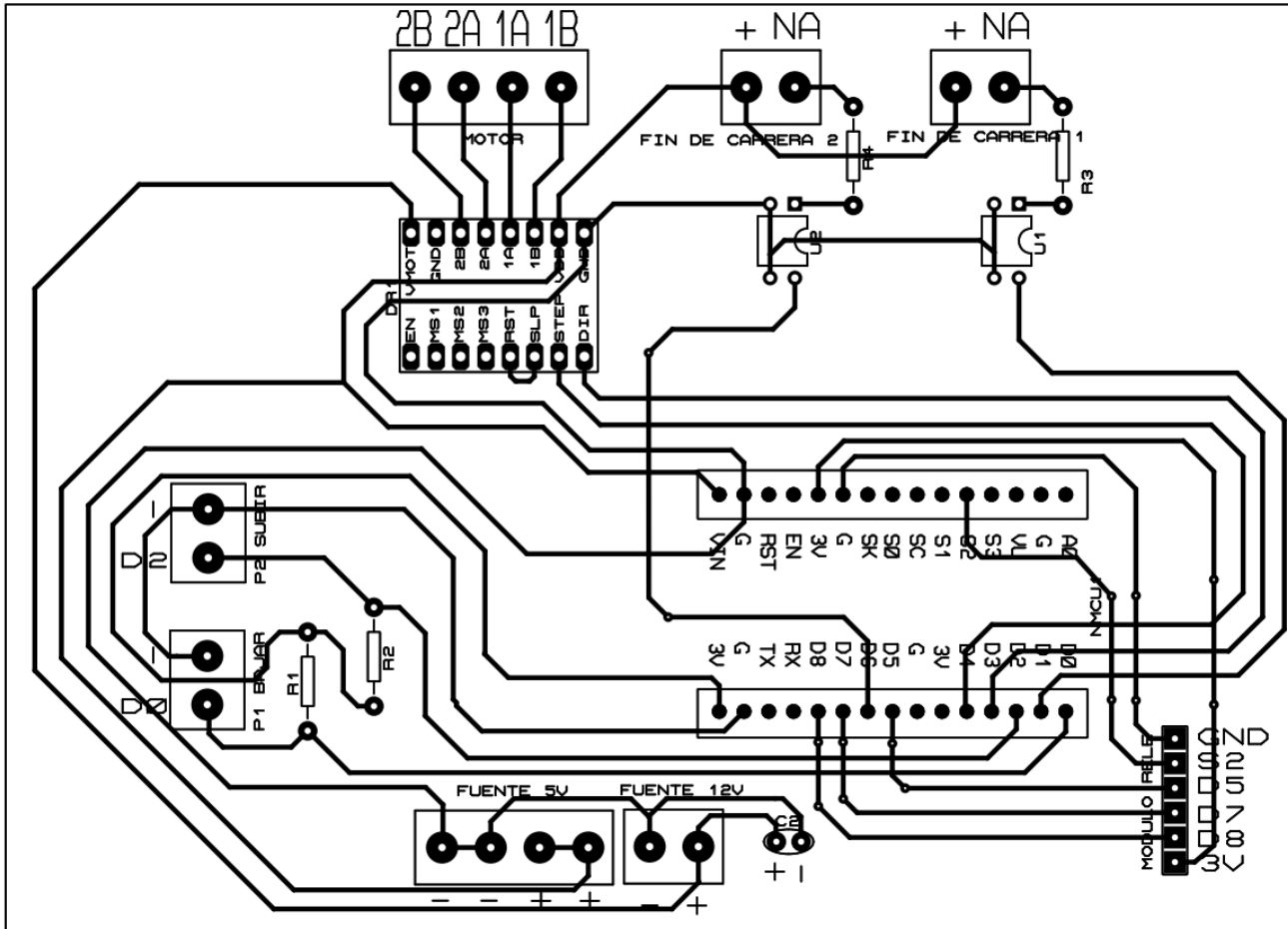
Pruebas y Resultados

Conclusiones

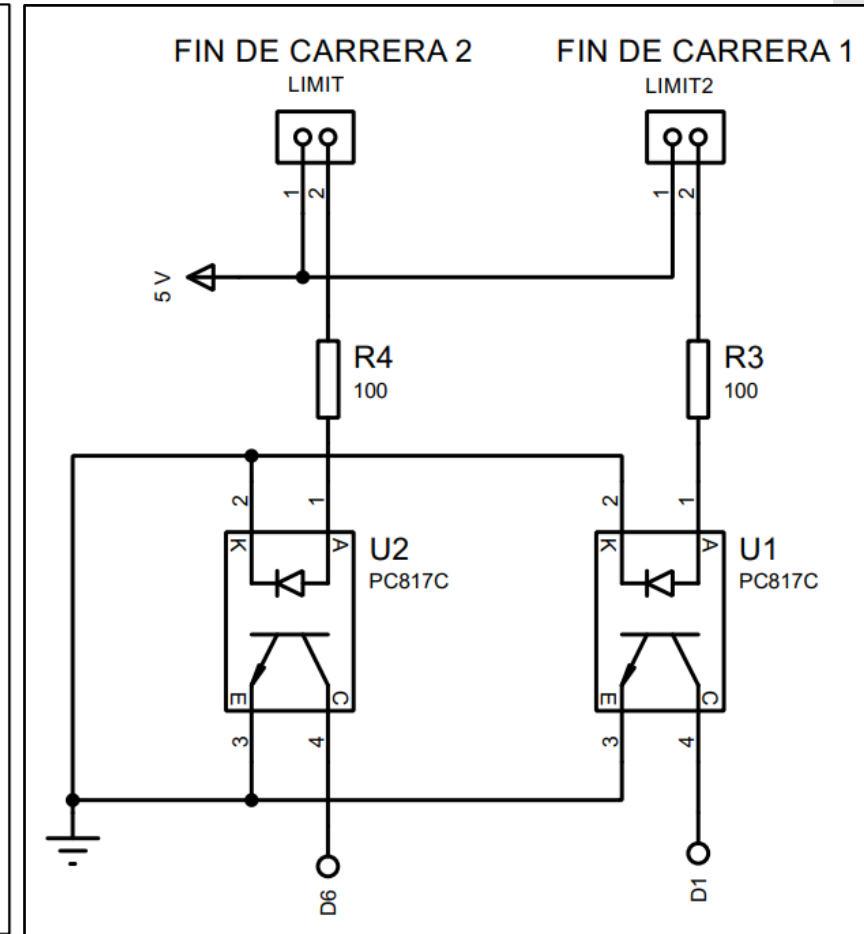
Recomendaciones

Trabajos futuros

- **Diseño de la placa PCB**



- **Circuito acondicionador**



- **Norma IPC 2221 PCB**



Construcción del mecanismo de proyección

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

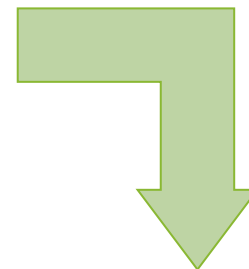
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Construcción de los reflectores de seguimiento

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

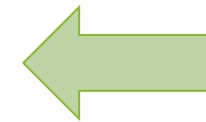
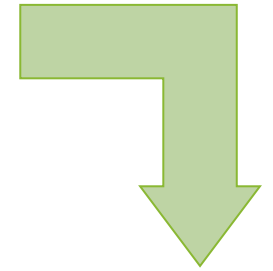
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

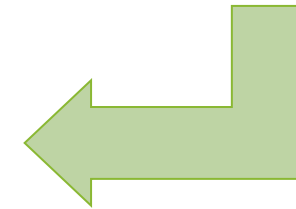
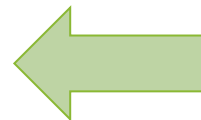
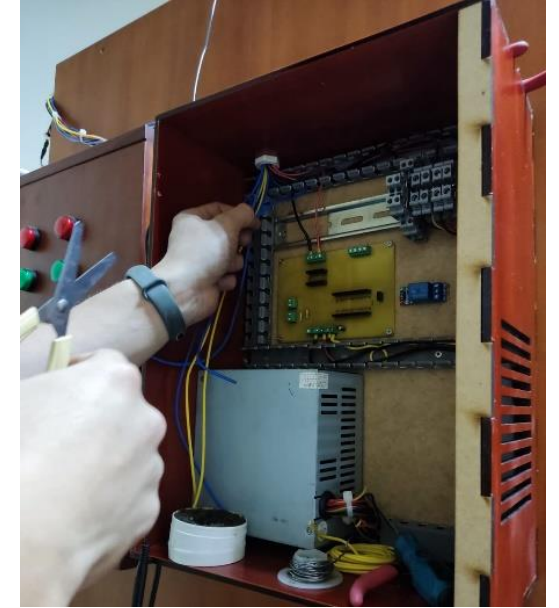
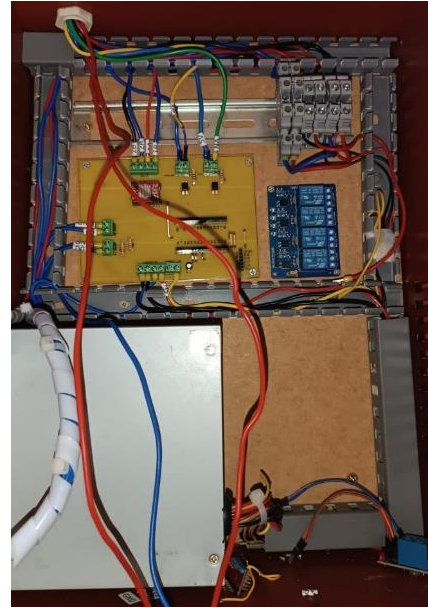
Recomendaciones

Trabajos futuros





Construcción del tablero de control



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



ECUADOR

Programación de tareas al robot Nao

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

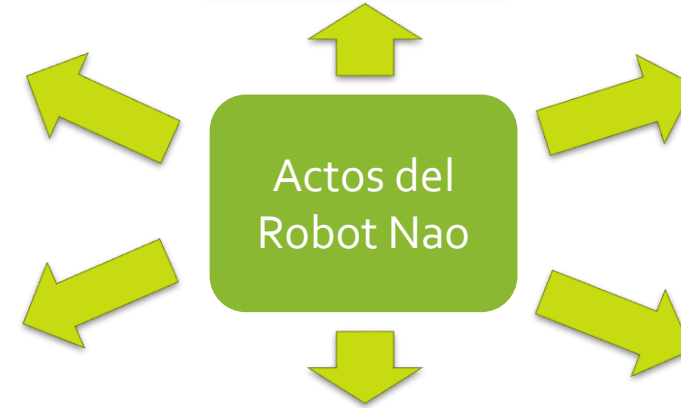
Cuadrar



Reverencia



Caminar



Festejo Dab

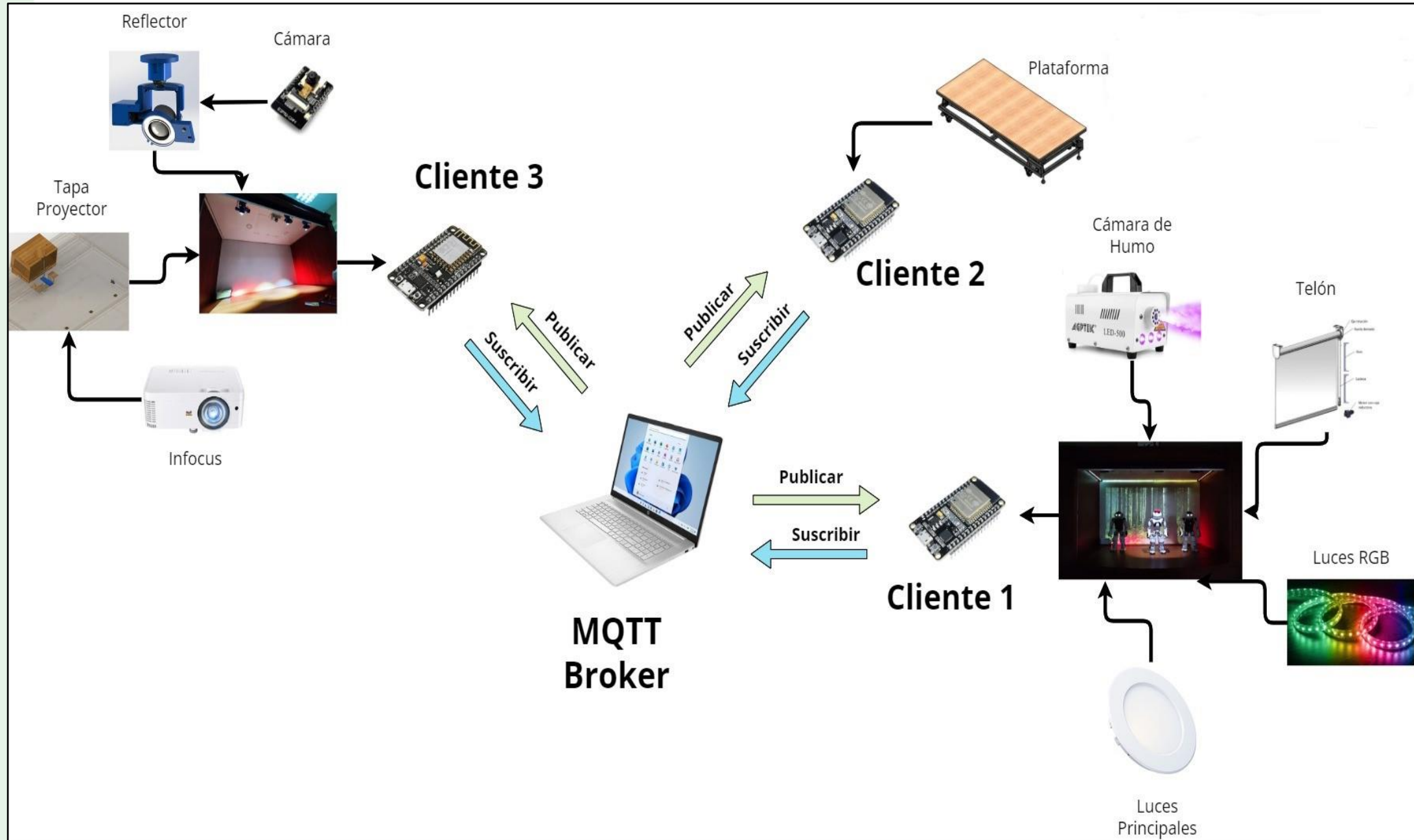


Baile Thriller





Arquitectura de control del teatro



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Arquitectura de control del reflector de seguimiento

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

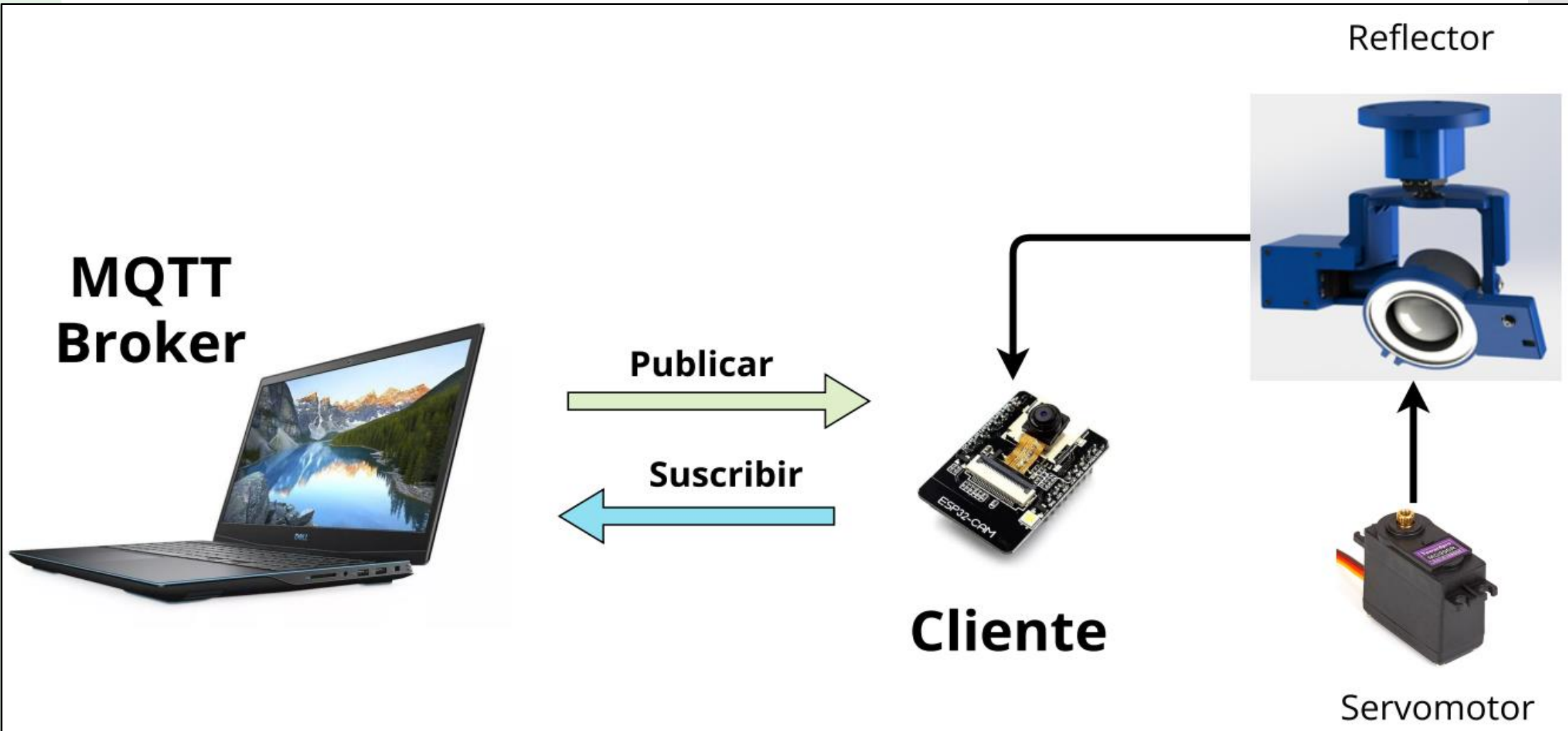
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

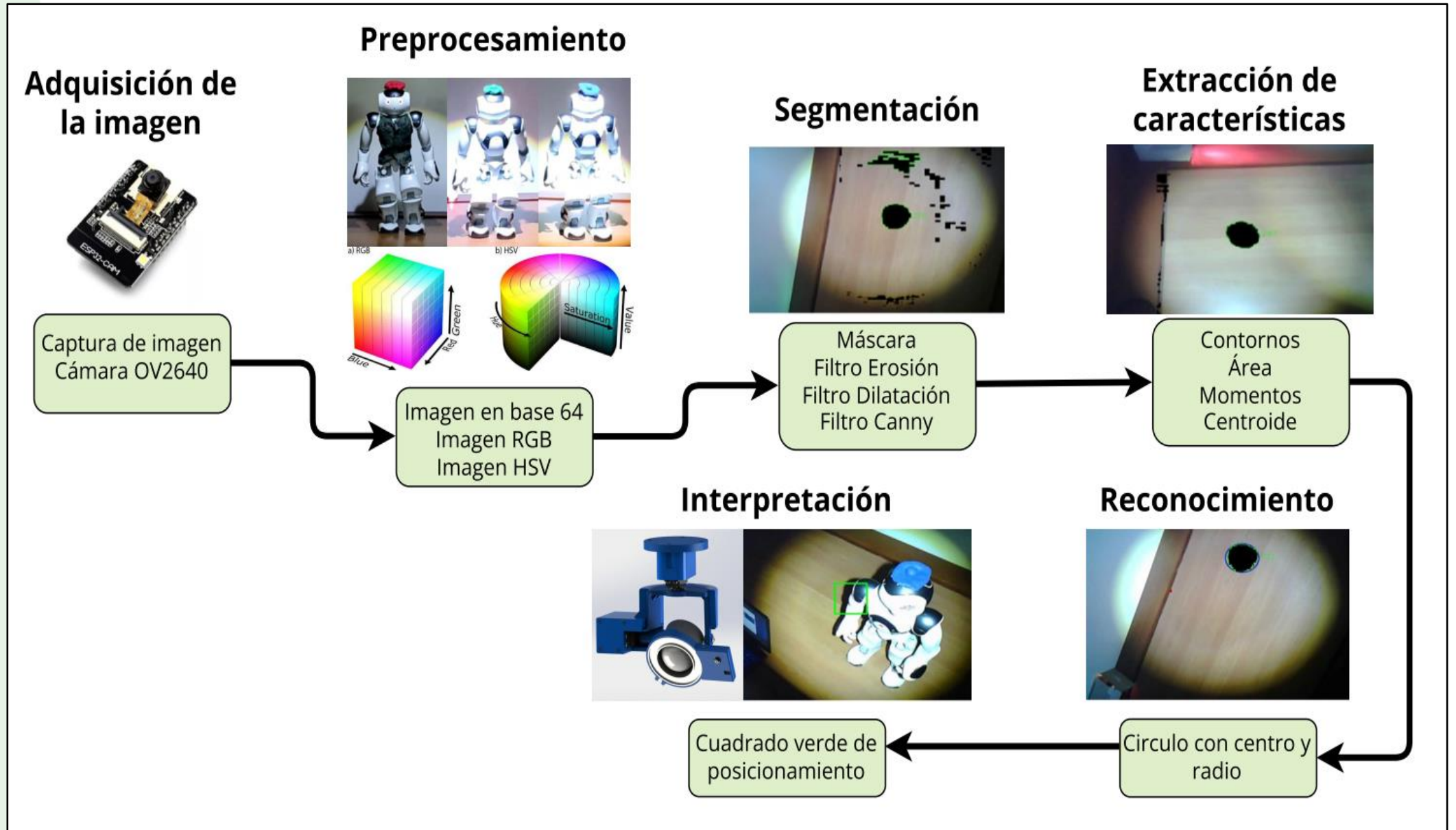
Trabajos futuros





Visión Artificial

- Procesamiento de imágenes de las boinas del robot Nao



Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Visión Artificial

- HMI de configuración del seguimiento de las boinas

Ventana Principal Configuración

Habilitar Configuración Ver límites P1: 300 300 P2: 450 400 Leer Guardado Guardar

ROJO: I: 180 D: 190 A: 100 B: 0

AZUL: I: 300 D: 40 A: 84 B: 15

VERDE: I: 280 D: 80 A: 50 B: 50

MASCARA 1

Bajo 0 0 0

Alto 50 150 255

MASCARA 2

Bajo 50 0 0

Alto 120 255 255

Area min 2000 Area ma 40000 Actualizar

MASCARA

Bajo 0 0 0

Alto 170 200 255

Area min 2000 Area ma 40000 Actualizar

MASCARA

Bajo 0 0 0

Alto 170 115 255

Area min 2000 Area ma 40000 Actualizar

Ventana Principal Configuración

Habilitar Configuración Ver límites P1: 430 230 P2: 390 300

ROJO: I: 100 D: 50 A: 0 B: 10

AZUL: I: 100 D: 40 A: 20 B: 15

MASCARA 1

Bajo 140 20 150

Alto 170 250 255

MASCARA 2

Bajo 0 0 0

Alto 0 0 0

Area min 1200 Area ma 40000 Actualizar

MASCARA

Bajo 90 40 150

Alto 126 255 255

Area min 7000 Area ma 10000 Actualizar

- **P1/P2:** configuración del cuadrado verde de detección
- **Bajo/Alto:** configuración HSV de los colores
- **I/D/A/B:** configuración del tamaño de la imagen
- **Área min/ Área max:** Configuración del área de la boina

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

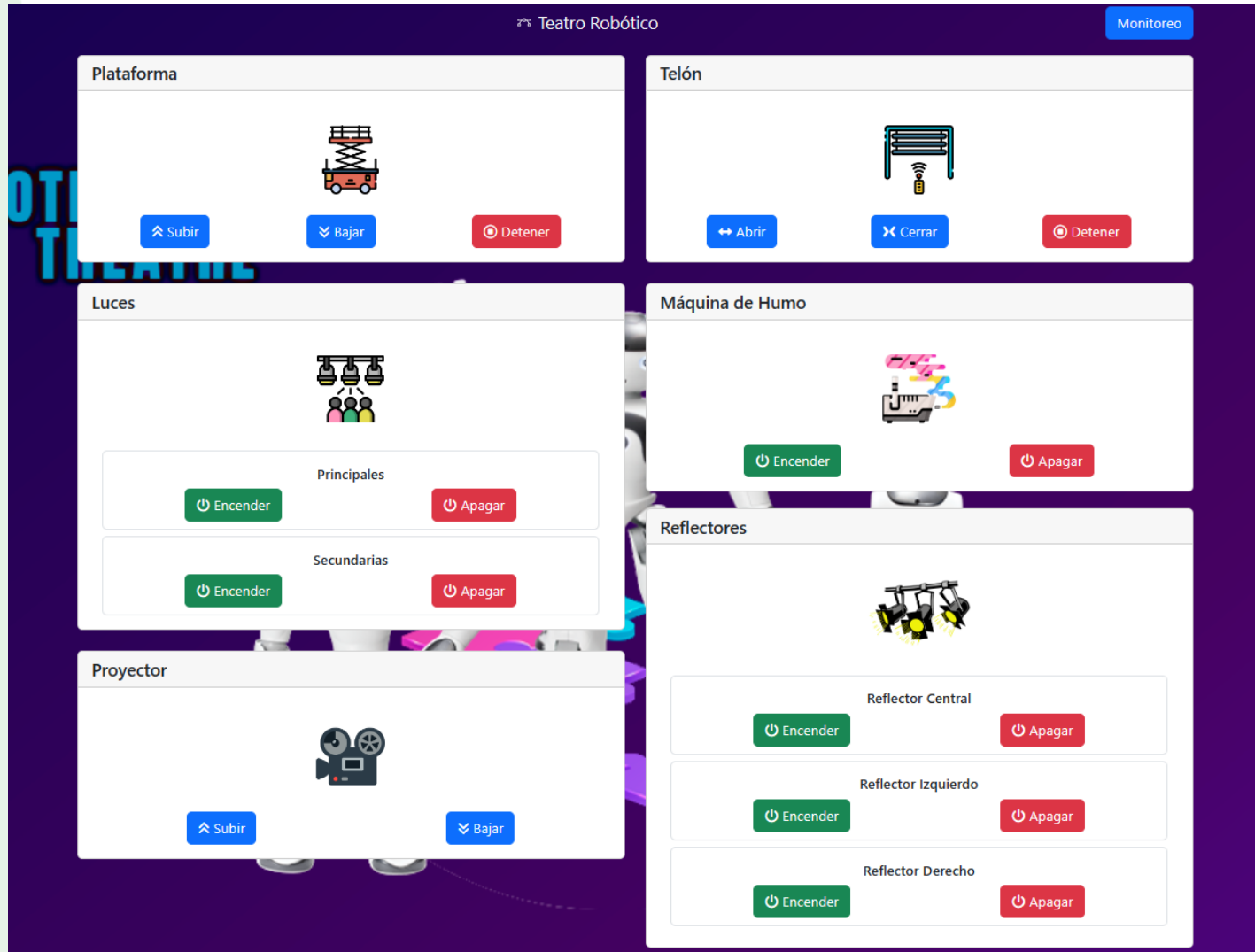
Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño de la página web del Teatro

- Control manual del escenario



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño de la interfaz gráfica del Teatro

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

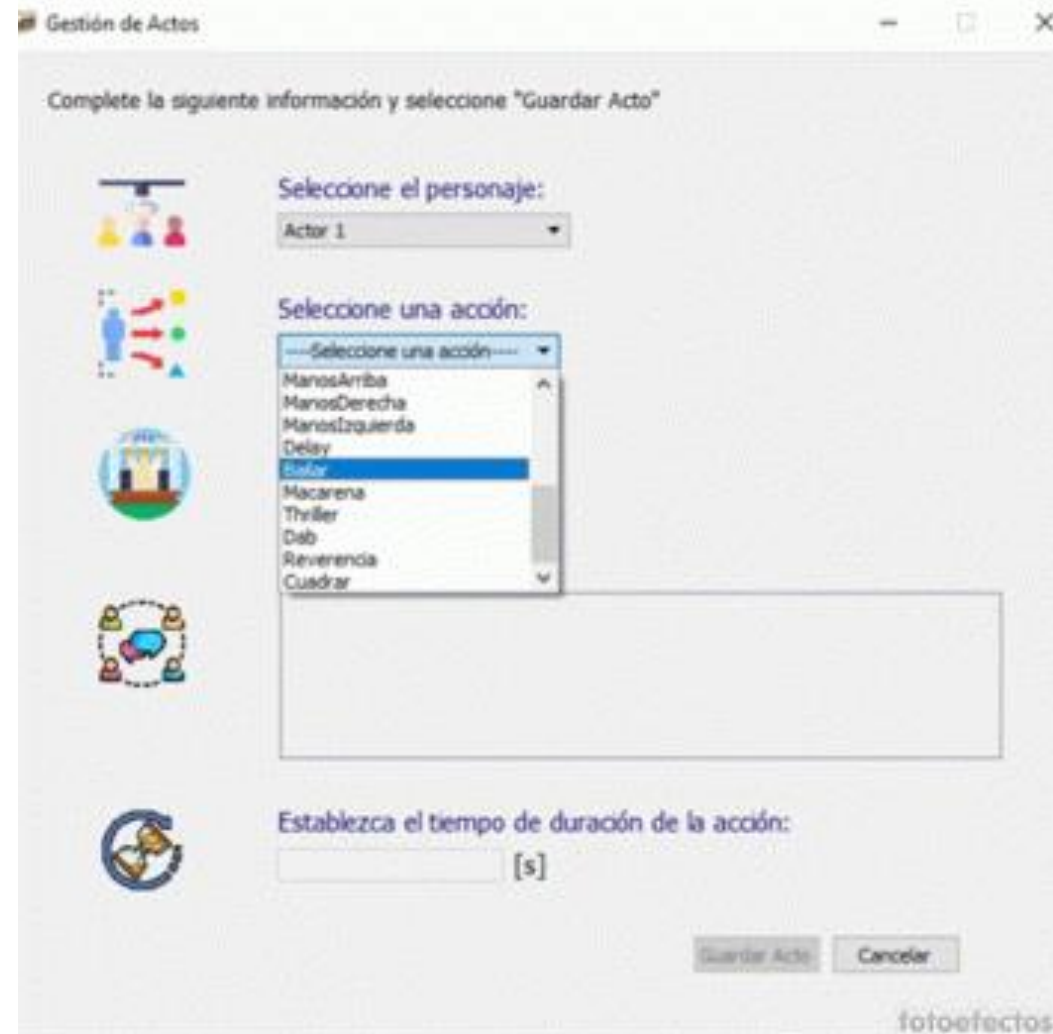
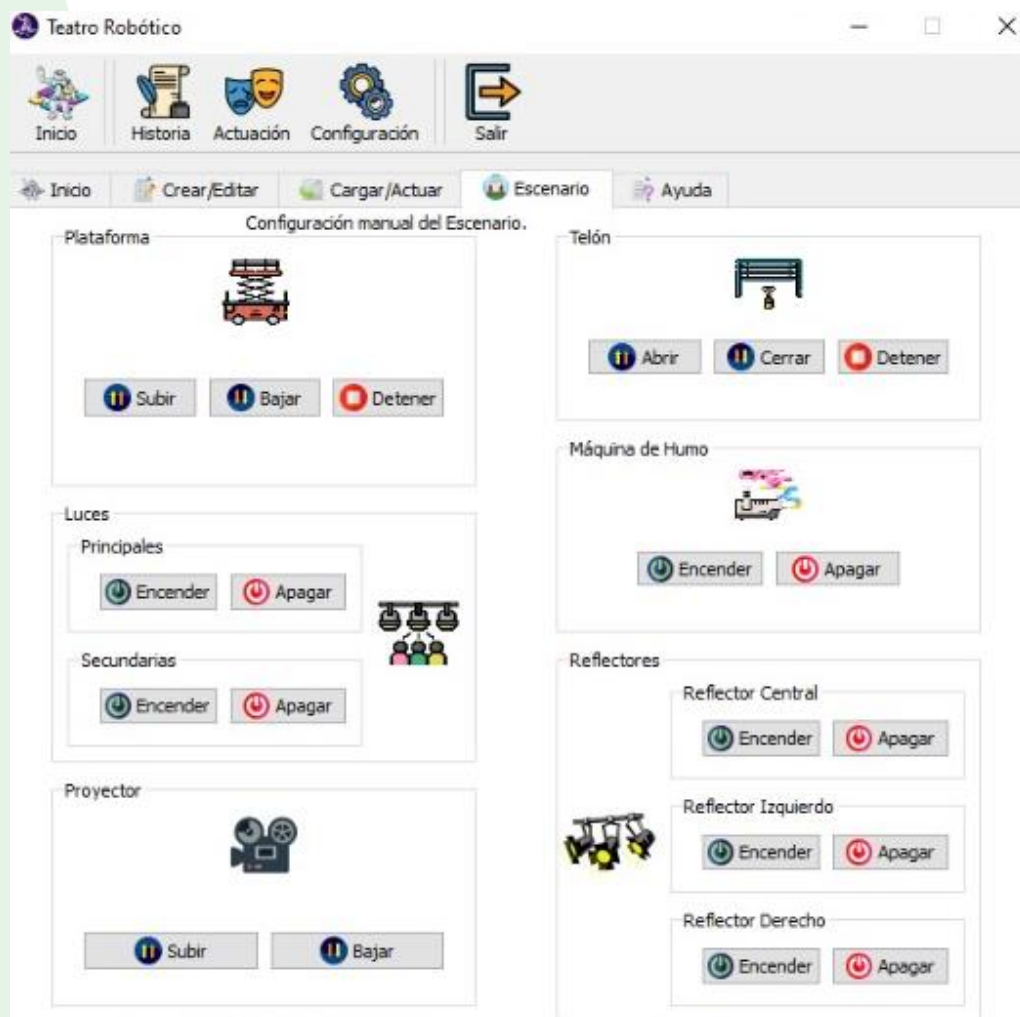
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Integración de sistemas

- Pruebas de iluminación y proyección en el Teatro
- Pruebas de seguimiento con el robot Nao



Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Pruebas y resultados

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

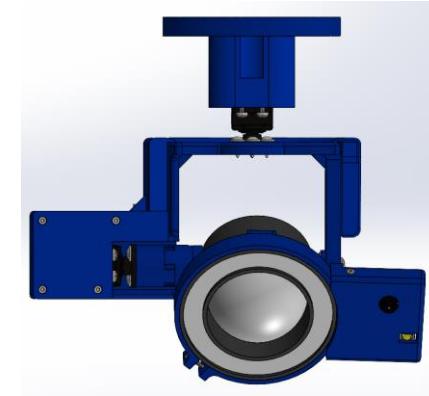
Pruebas y Resultados

Conclusiones

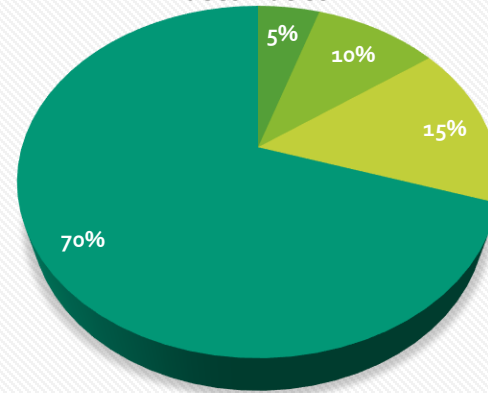
Recomendaciones

Trabajos futuros

Cualitativo	Cuantitativo
Fracaso	1
Deficiente	2
Bueno	3
Éxito	4

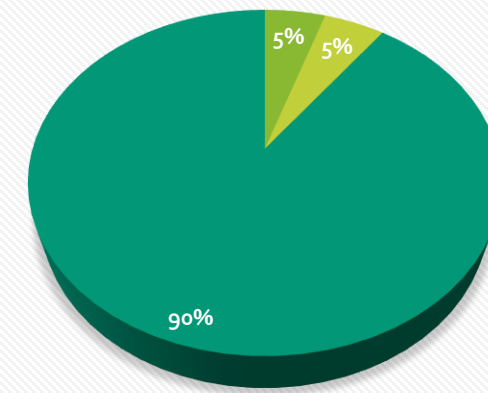


Funcionamiento de reflectores con accionamiento automático



■ Fracaso ■ Deficiente ■ Bueno ■ Éxito

Funcionamiento de reflectores de manera manual



■ Fracaso ■ Deficiente ■ Bueno ■ Éxito



Pruebas y resultados

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

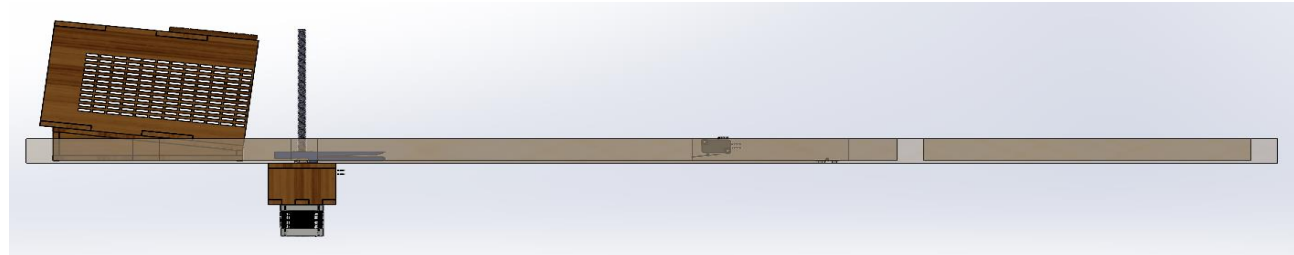
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

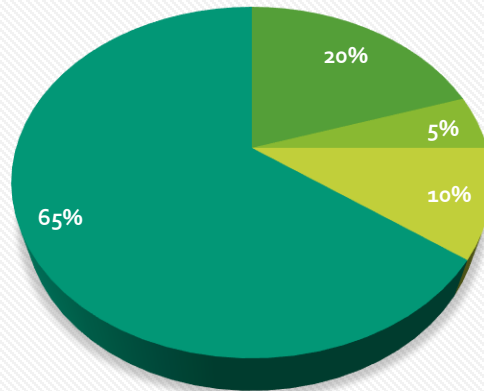
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

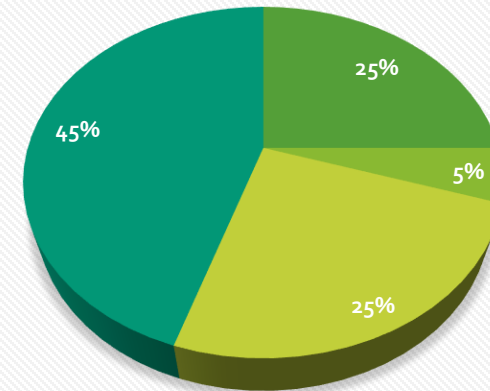


Funcionamiento del elevador de proyector con accionamiento automático



■ Fracaso ■ Deficiente ■ Bueno ■ Éxito

Funcionamiento del elevador de proyector con accionamiento manual



■ Fracaso ■ Deficiente ■ Bueno ■ Éxito



Pruebas y resultados

Pruebas de visión artificial

- Exactitud

$$S = \frac{TP}{TP + FN}$$

- Precisión

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$

- Sensibilidad

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$

- Especificidad

$$E = \frac{TP}{TP + FP}$$

- F1 Score

$$R = 2 * \frac{\textit{Precisión} * \textit{Sensibilidad}}{\textit{Precisión} + \textit{Sensibilidad}}$$

		Predicción	
		Negativo	Positivo
Valor real	Negativo	Verdadero negativo (TN)	Falso positivo (FP)
	Positivo	Falso negativo (FN)	Verdadero positivo (TP)

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Pruebas y resultados

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

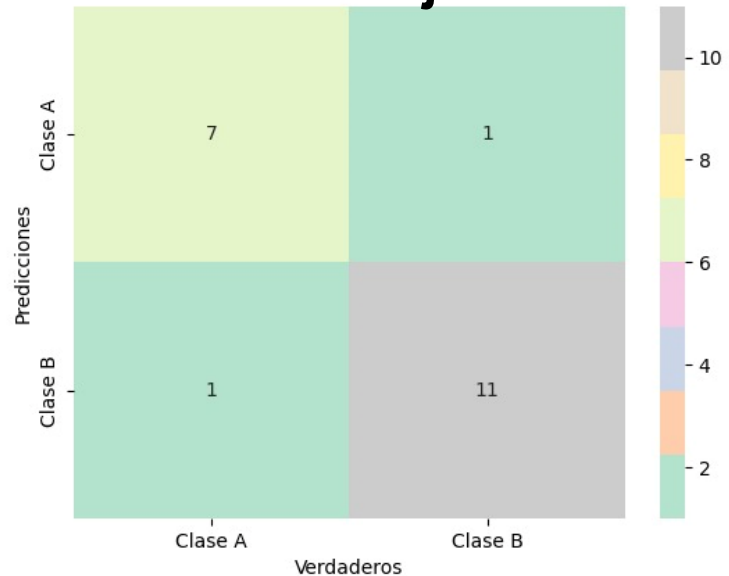
Pruebas y Resultados

Conclusiones

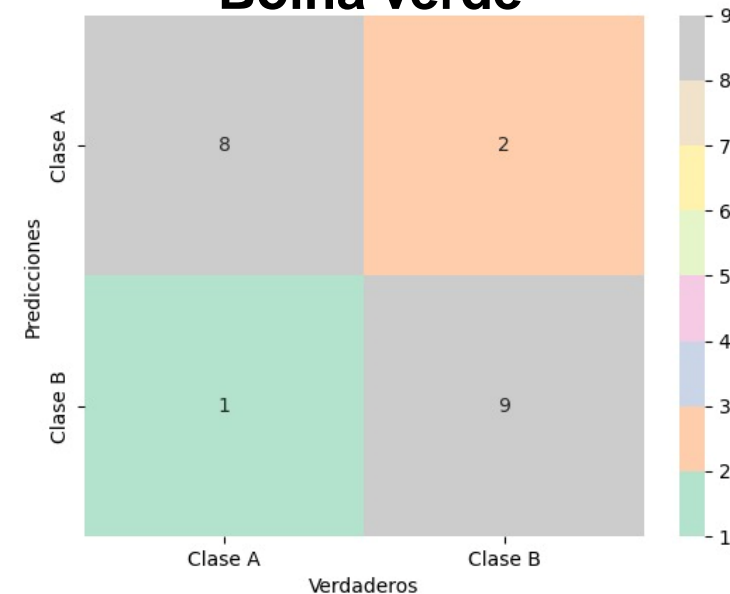
Recomendaciones

Trabajos futuros

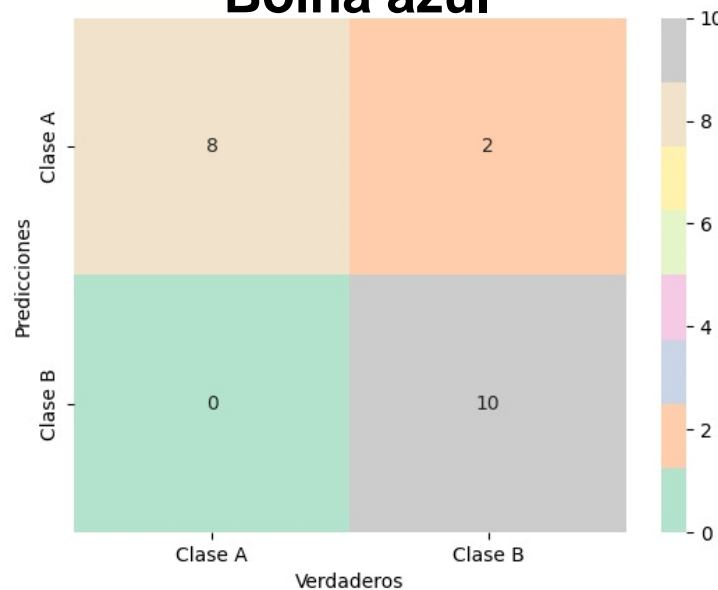
Boina roja



Boina verde



Boina azul



Pruebas de visión artificial



Pruebas y resultados

Pruebas de visión artificial

- Resultados con un total de 20 muestras

Boina Roja	
Exactitud	90%
Precisión	91.67%
Sensibilidad	91.67%
Especificidad	87.5%
F1 score	91.67%

Boina Verde	
Exactitud	85%
Precisión	81.81%
Sensibilidad	90%
Especificidad	80%
F1 score	85.71%

Boina Azul	
Exactitud	90%
Precisión	83.33%
Sensibilidad	100%
Especificidad	80%
F1 score	90.91%

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

1

- ✓ Entorno inalámbrico, que exhibe una iluminación
- ✓ Detección de color eficiente
- ✓ Proyección pintoresca de la imagen en el escenario.
- ✓ Visualización de una imagen panorámica en el interior de escenario

2

- ✓ Se estableció una comunicación efectiva entre los 3 diferentes clientes del entorno teatral
- ✓ Casos de funcionamiento bueno y exitoso sobre el 80%.



3

- ✓ rendimiento óptimo y evitar la congestión en la transferencia de datos o pérdida de paquete
- ✓ Incrementa la fluidez y confiabilidad de la operación del sistema





Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

4

- ✓ Existe una amplia diversidad de movimientos síncronos, equilibrados, y novedosos
- ✓ Detección de color eficiente
- ✓ Mantiene la suficiente estabilidad en durante la ejecución de las acciones.
- ✓ "La Macarena", baile del video musical "Thriller" de Michael Jackson, saludo militar y un festejo como el "Dab"



5

- ✓ Verde F1 score =85.71%,
- ✓ Azul F1 score =90.91%
- ✓ Rojo F1 score =91.67%
- ✓ El reflector de seguimiento de la boina de color rojo, tiene el mejor desempeño respecto a los otros sistemas



Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

1. Mantenimiento periódico y adecuado de los sensores, actuadores, y de los mecanismos asociados, al entorno robótico

2. Se recomienda, asegurarse de que el robot Nao esté ubicado correctamente en el centro del panel del teatro, o de manera que tenga suficiente espacio para desenvolverse sin interrupción

Recomendaciones

3. Es recomendable programar los movimientos de manera coherente, de tal forma que la velocidad de cada motor que posee el robot permita salvaguardar su centro de gravedad

4. Para el uso de los reflectores de seguimiento al robot, se recomienda, colocar la boina de color verde al robot ubicado a la izquierda, la boina de color rojo al robot ubicado en el centro, y la boina de color azul al robot ubicado al lado derecho.



Antecedentes y
Justificación

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Trabajos Futuros

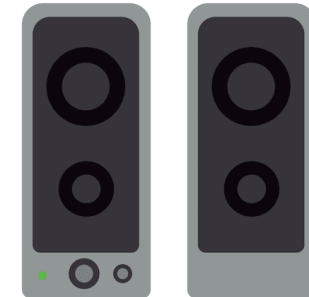
Implementación de un HMI (Interfaz Hombre-Máquina) construida sobre el sistema operativo de una Raspberry Pi



Actualizar todo el entorno de control del teatro, a la versión más actual de Python



Incorporar un sistema de audio exclusivo para el escenario





MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

