

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

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO  
ARTICULADO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD DE APLICATIVO  
“PICK AND PLACE” PARA UN ROBOT DE TELEPRESENCIA”**

**AUTORES:          BENAVIDES HERNÁNDEZ ISIDRO ISRAEL**

**MONAR REDROBAN, JAVIER**

**DIRECTOR: ING. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**

**2022**





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Antecedentes

- Brazos Robóticos en sistemas de Teleoperación.
- Tele- Operación Bilateral

*Robot de  
telepresencia asistida*



(Koceski & Koceska, 2016)

*Robot móvil para  
telepresencia*



(Medina et al., 2018)

*Tele-Operación  
Bilateral de un robot  
manipulador móvil*



(Varela Aldás, 2016)



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Definición del problema

- Necesidad de creación de automatismos capaces de suplantar la realización de tareas:
  - Peligrosas
  - Agotadoras
  - Desagradables
- Comunicación física más cercana a distancia.
  - Tareas de manipulación de objetos
  - Alcance Social Ilimitado





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

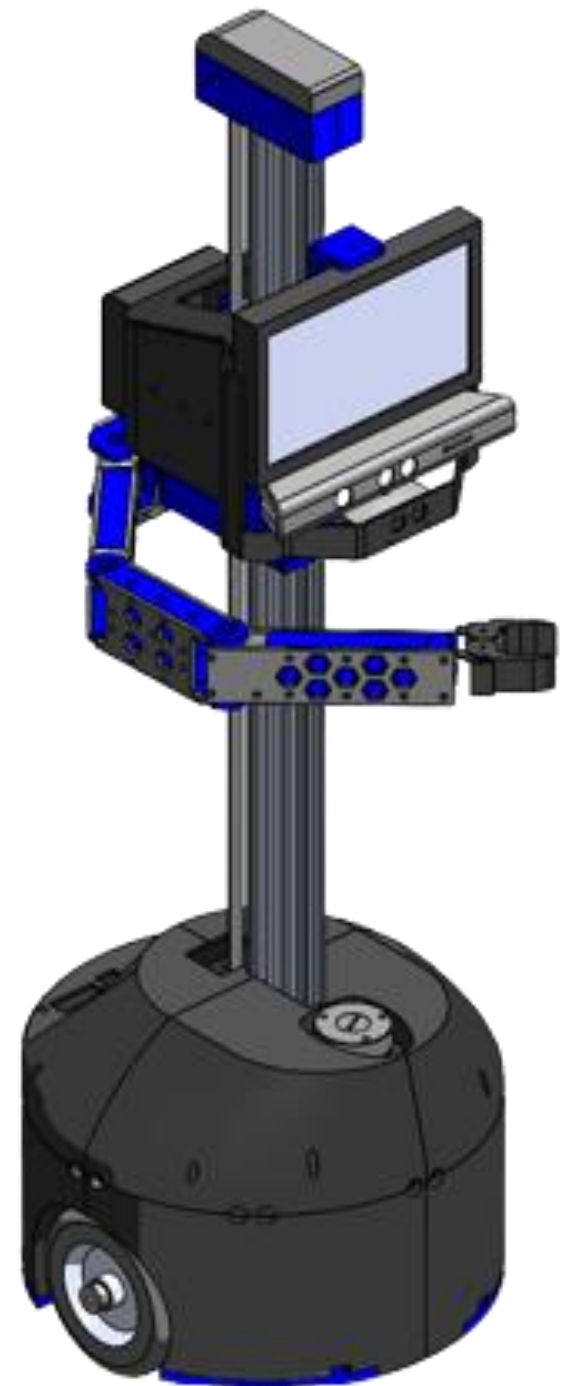
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Justificación e Importancia

- Sistema móvil de telepresencia
- Habilidad de recoger y colocar objetos
- Nuevo enfoque: Operación bilateral de un robot





[Introducción](#)

[Investigación  
previa](#)

[Metodología](#)

[Diseño y  
construcción](#)

[Pruebas y  
Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajos futuros](#)

# Objetivos

## GENERAL

- Diseñar y construir un brazo robótico articulado de 4 grados de libertad de aplicativo “pick and place” para un robot de telepresencia.

## ESPECÍFICOS

- Analizar y desarrollar los cálculos de la cinemática y dinámica del brazo robótico articulado.
- Realizar el diseño del sistema mecánico de la estructura del brazo robótico (base o soporte del brazo articulado, eslabones, articulaciones y gripper).
- Realizar el diseño del sistema electrónico del brazo articulado que permita el control de los elementos de accionamiento.
- Diseñar la carcasa del sistema de telepresencia juntamente con el brazo robótico.
- Desarrollar un sistema de reconocimiento “pick and place” de objetos (pequeños) determinados por métodos de visión artificial.
- Desarrollar una HMI para el control del brazo robótico como también para la simulación del sistema.



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Alcance



- Brazo robótico manipulador de 4GDL
- Visión Artificial
- Aplicación “pick and place”

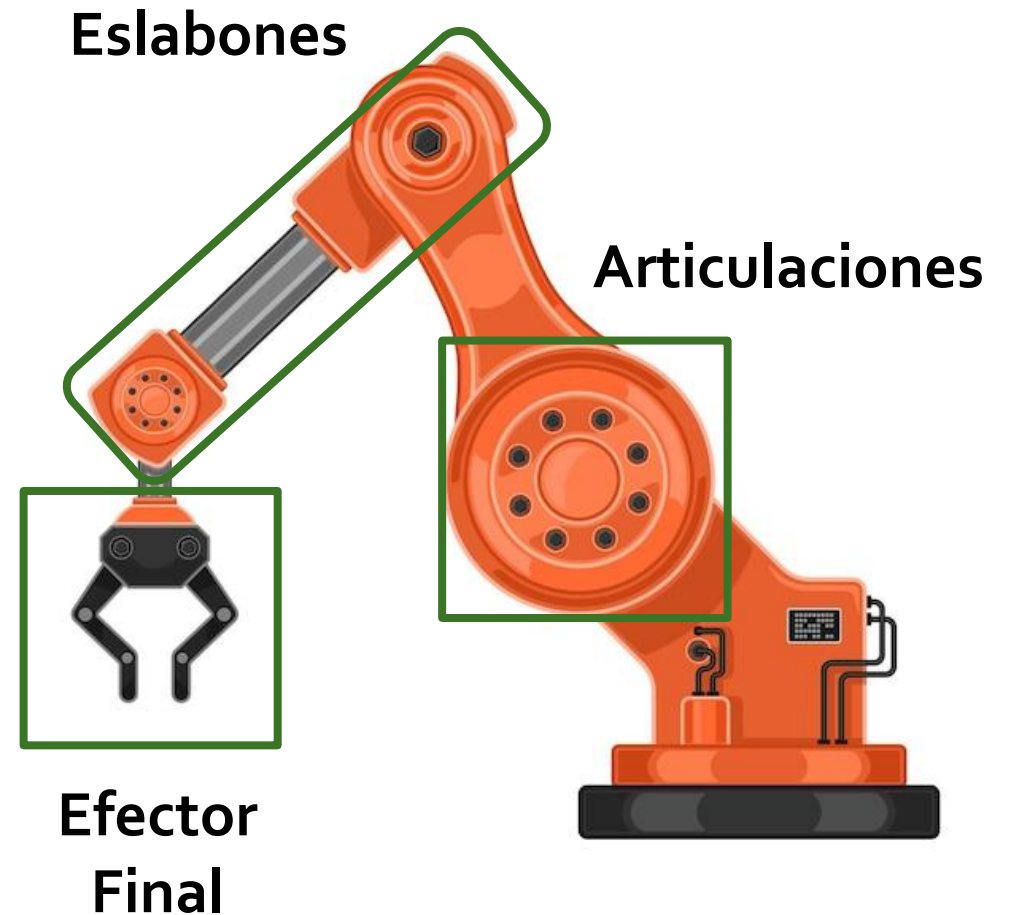


# Robot Manipuladores

**Máquina reprogramable y multifuncional**

- Mayor Productividad y Eficiencia
- Gran flexibilidad para trabajar en diferentes tareas
- Robótica social y de servicio

- Grados de Libertad (GDL)
- Tipos de Articulaciones



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



# Cinemática y Dinámica de Robots Manipuladores

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

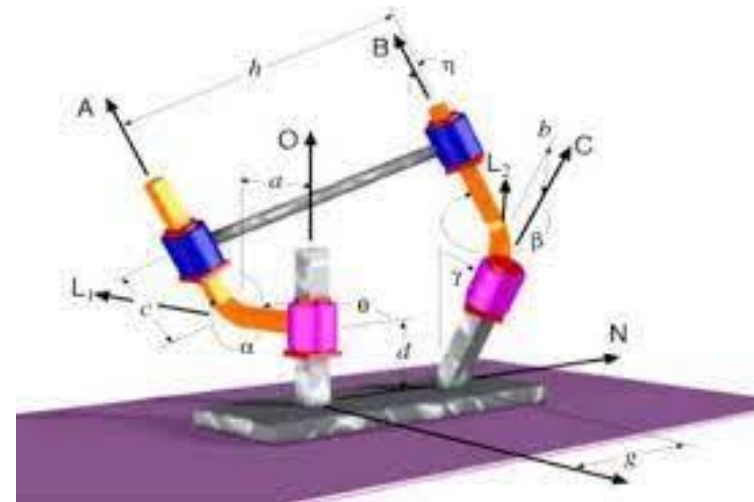
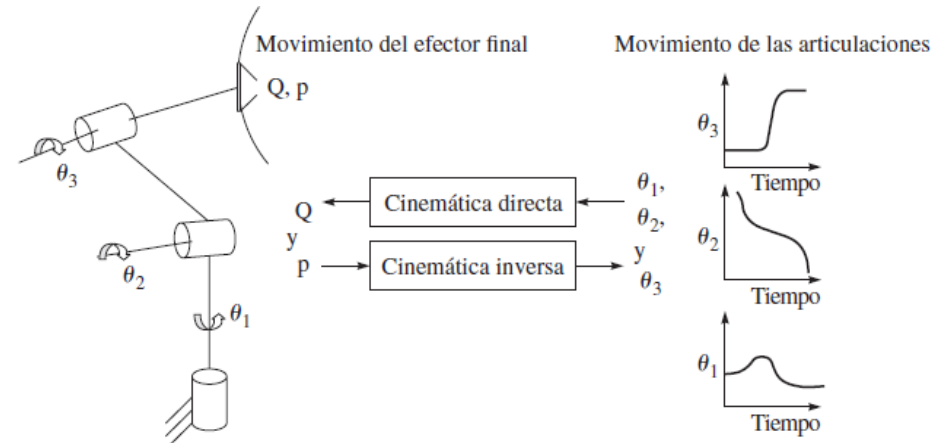
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

**Cinemática:** Estudia el movimiento sin la intervención de las fuerzas.

**Dinámica:** Estudia las fuerzas y torques que causan el movimiento.







Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# ROS (Robot Operating System)

## ROS

- Librerías y herramientas para desarrollo de aplicaciones Robóticas
- Drivers y Algoritmos

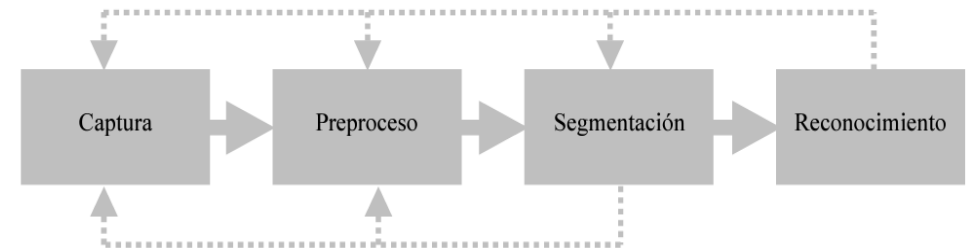
 **MoveIt**



# Visión Artificial

Extracción de información y características relevantes

- Captar, Analizar y Actuar de forma casi autónoma
- Permiten retroalimentación sensorial





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

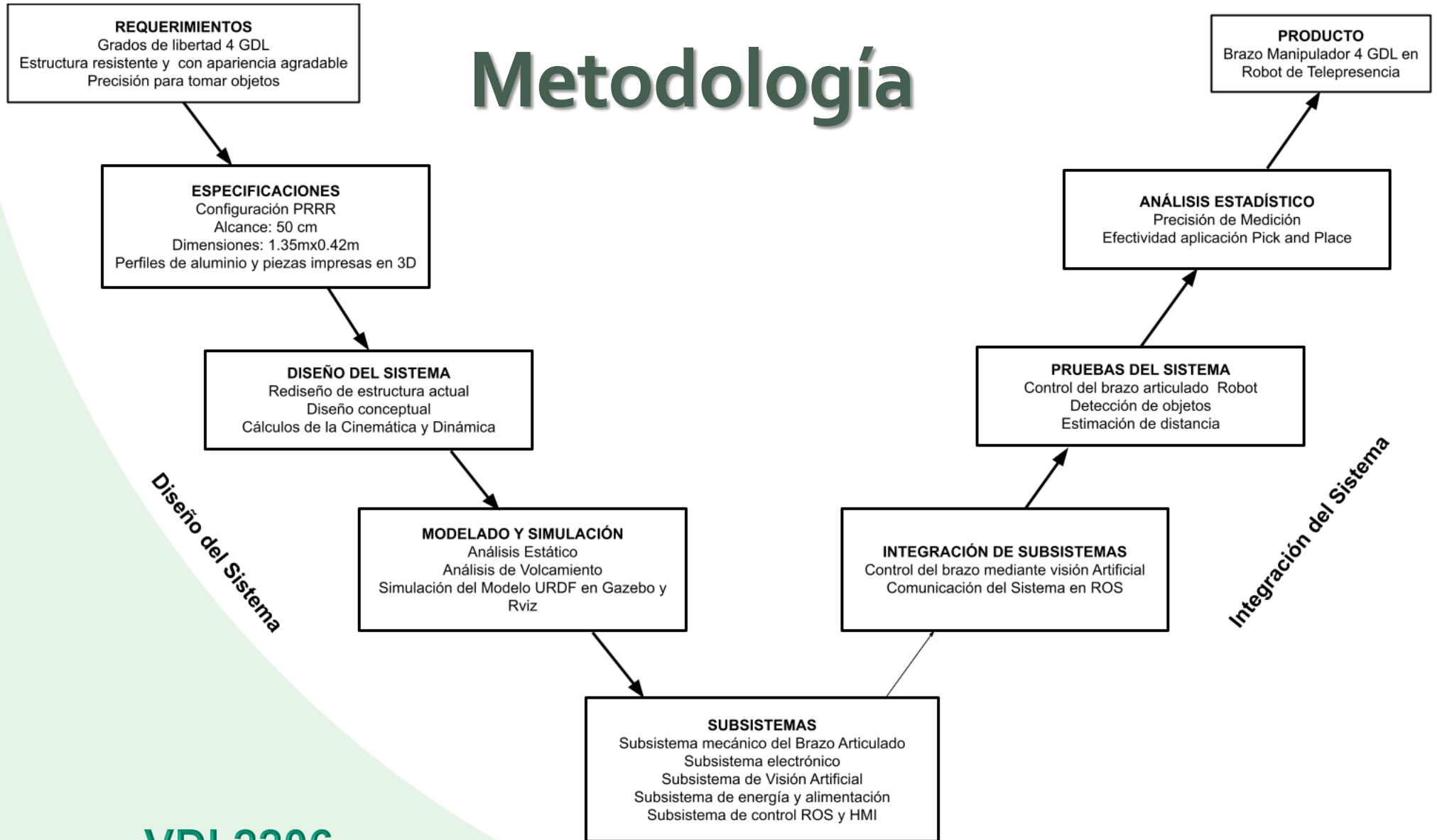
Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Metodología



**VDI 2206**  
**Diseño Concurrente**

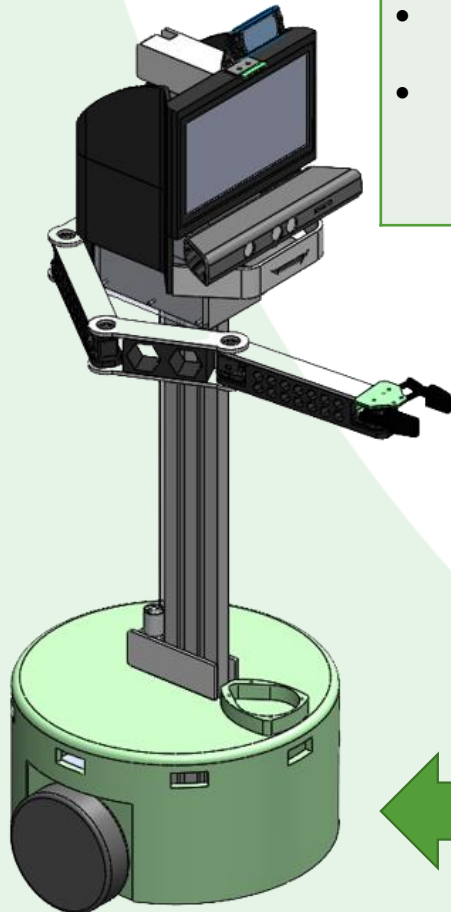
**Diseño Específico**



# Diseño Conceptual

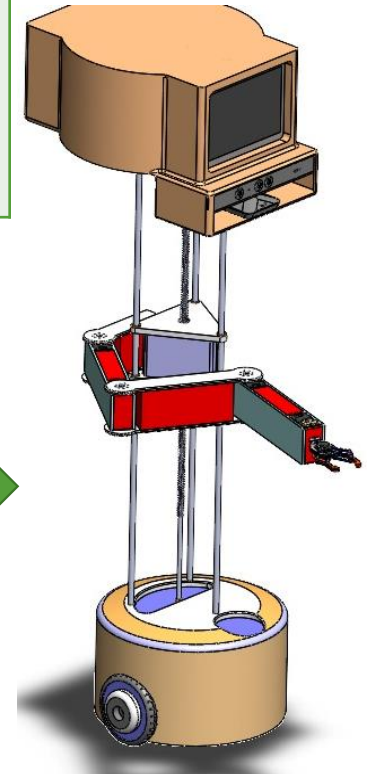
## Combinación de Conceptos

Forma estructural de articulación prismática.	Transmisión de movimiento en articulación prismática	Transmisión de movimiento Articulación Rotacional	Tipo de efector final
<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructura triangular con 3 ejes guías.</li> <li>Estructura con un perfil rectangular guía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tornillo sin fin.</li> <li>Banda dentada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Directa</li> <li>Poleas con Correas</li> <li>Sistema de piñón y engranaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pinzas de Enganche</li> </ul>



Ventajas	Desventajas
Compactos	Bajo rendimiento
Elevada capacidad de carga	Desgaste en las superficies de apoyo
Sencillos de diseñar y fabricar	Requiere que sean altamente resistentes
Permiten un movimiento lineal preciso	Deben estar perfectamente calibrados
Alta reducción de velocidad	Riesgo de desgaste en los filetes
No generan ruido	
Económico	

Ventajas	Desventajas
Fácil montaje	No soportan altas temperaturas
Amortigua impactos en la transmisión	Deterioro mayor a factores ambientales
Nivel de ruido mínimo (silencioso)	
Transmite potencia a distancia	
Económicos y Poco mantenimiento	
Fácil cambio de relación de transmisión	



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

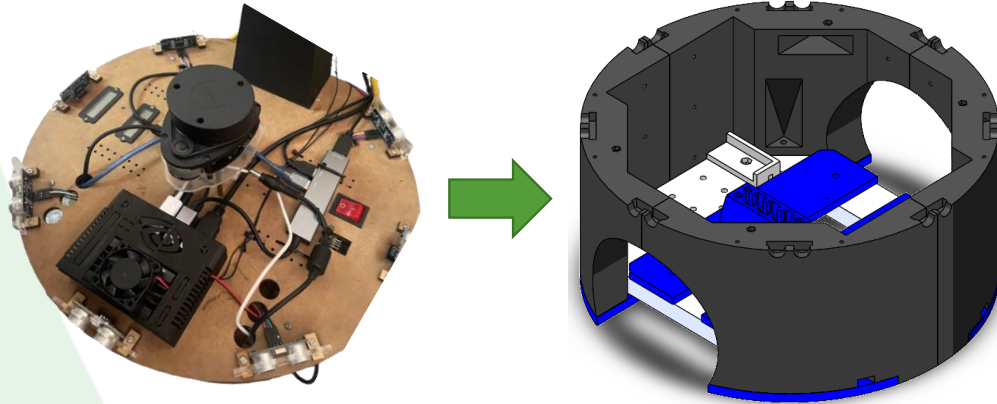
Conclusiones

Recomendaciones

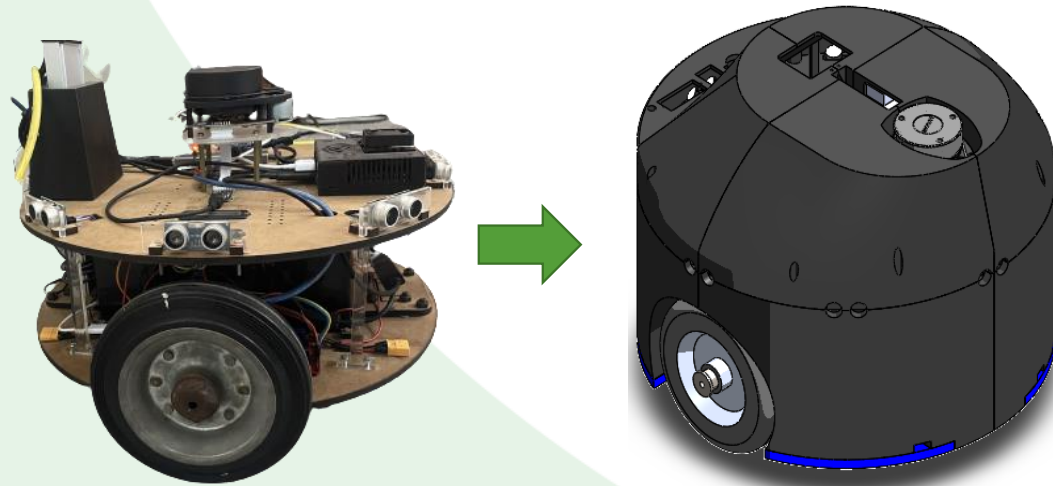
Trabajos futuros

# Diseño Estructural

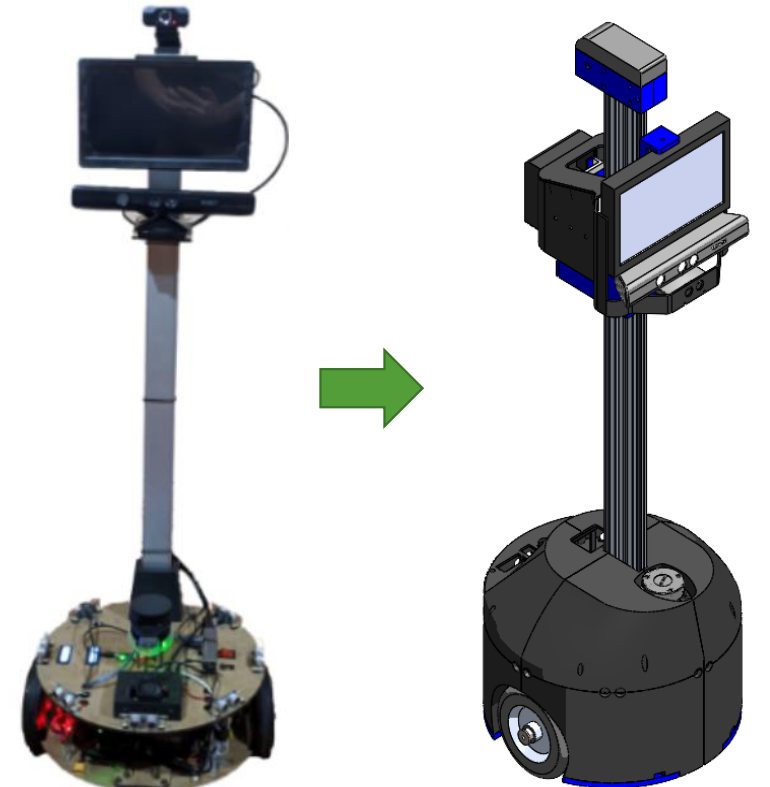
## Base Móvil Superior



## Base Diferencial



## Cubierta Base Diferencial





# Diseño Estructural

## Análisis Estático de la Estructura

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

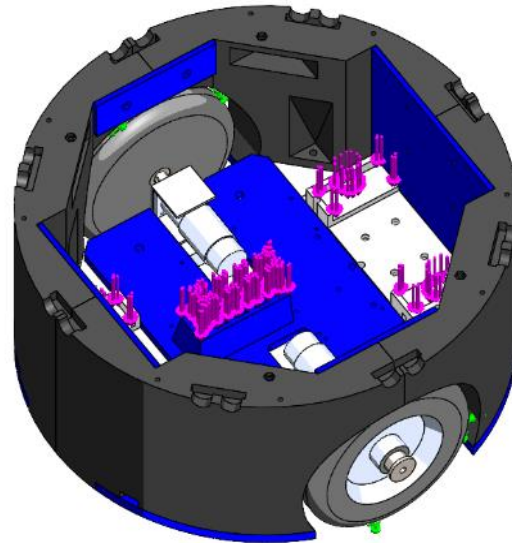
Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

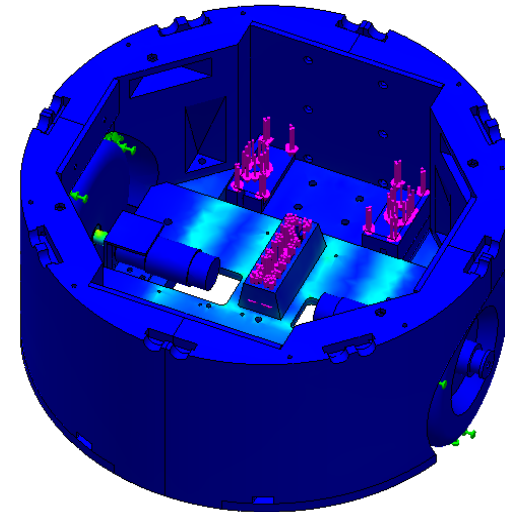
Recomendaciones

Trabajos futuros

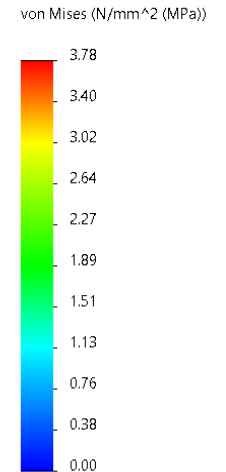
Proceso de  
Manufactura  
Aditiva  
Material: PLA



- 80N Sección Columna
- 2N Base de Batería



Análisis de Tensiones de la Base  
3.78MPa





# Diseño Estructural

## Análisis Estático de la Estructura

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

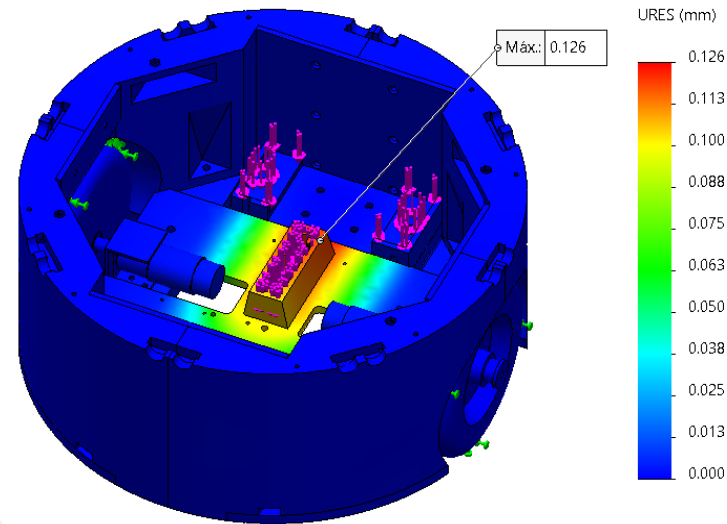
Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

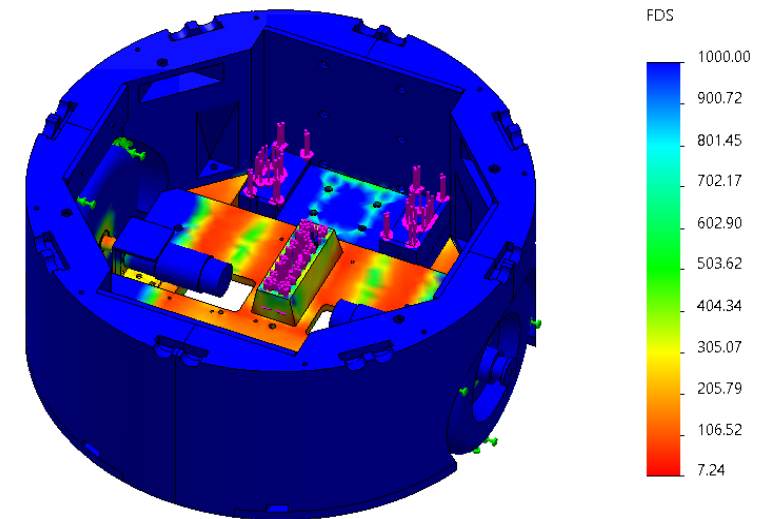
Recomendaciones

Trabajos futuros



Análisis de deformaciones de la Base

0.126mm



Factor de Seguridad de la Base

7.24



# Diseño Brazo Articulado

## Diseño de Eslabones

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

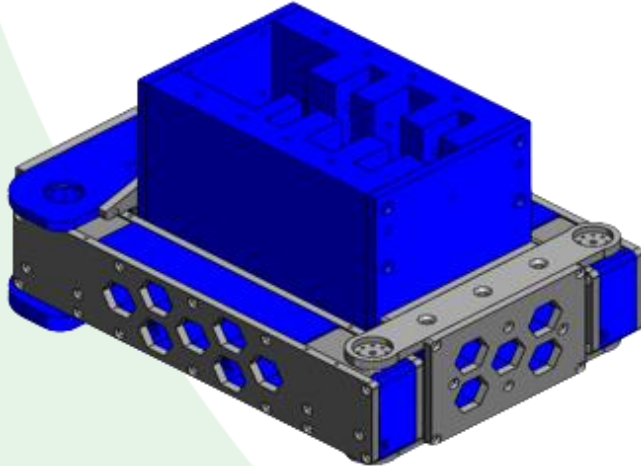
Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

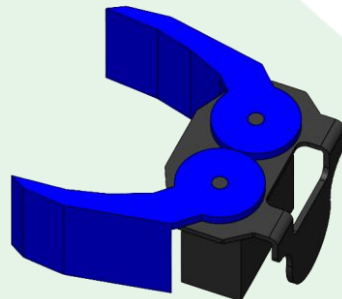
Recomendaciones

Trabajos futuros

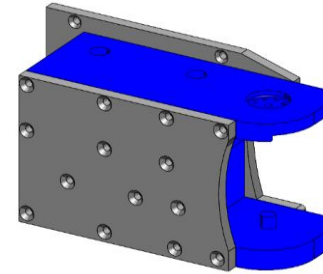
Posición Inicial del Robot



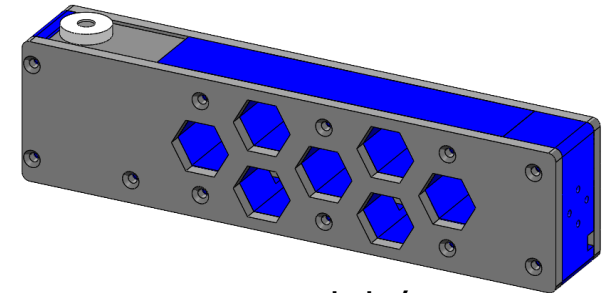
Efactor Final



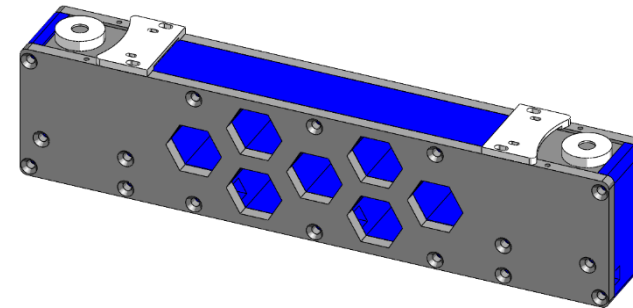
Diseño de Eslabones



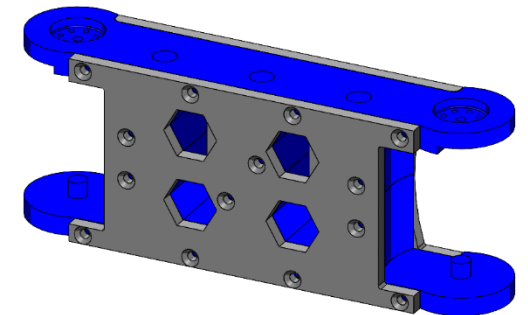
Eslabón Fijo



Tercer Eslabón



Primer Eslabón



Segundo Eslabón

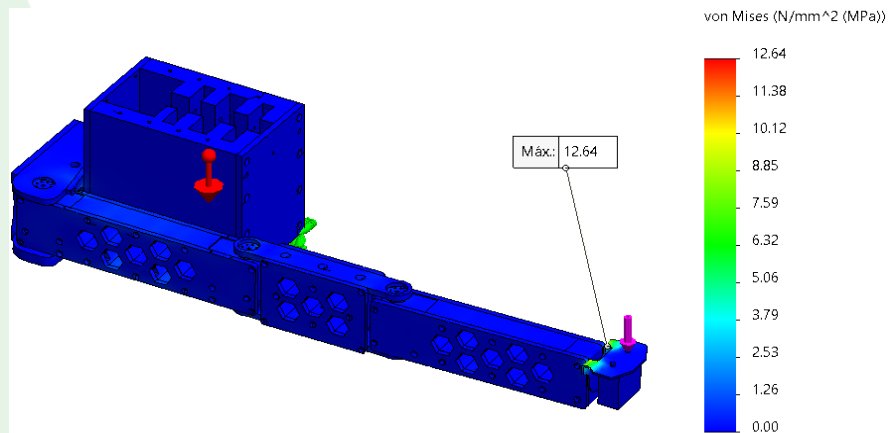


# Diseño Brazo Articulado

## Análisis Estático del Brazo Articulado

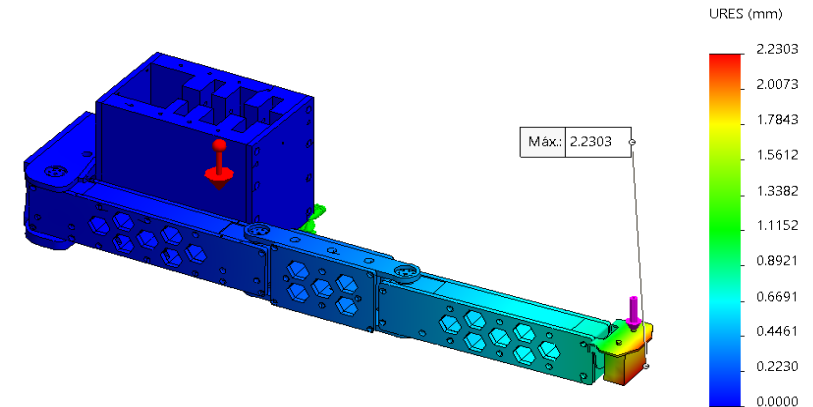
### Análisis de Tensiones de la Base

12.64MPa



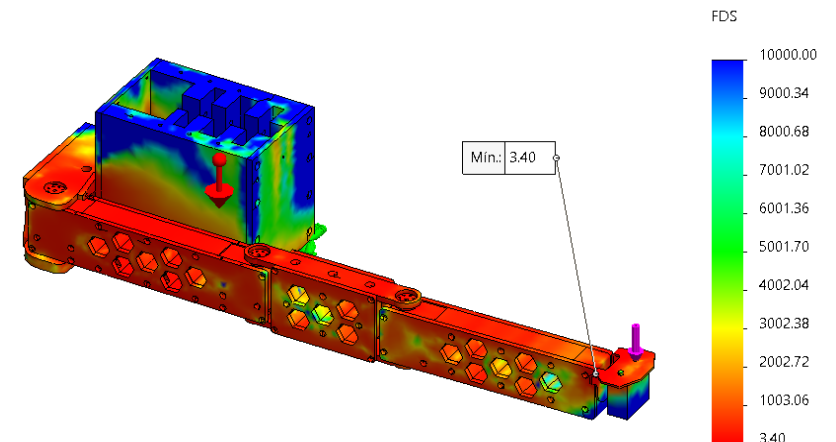
### Análisis de deformaciones

2.23mm



### Factor de Seguridad de la Base

3.4



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

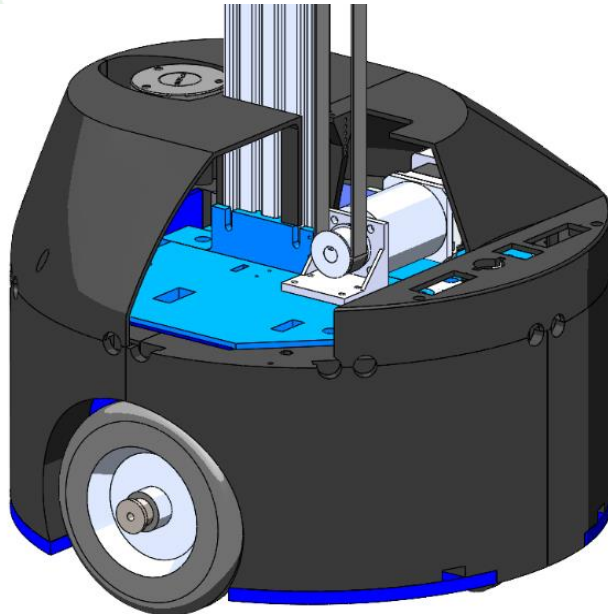




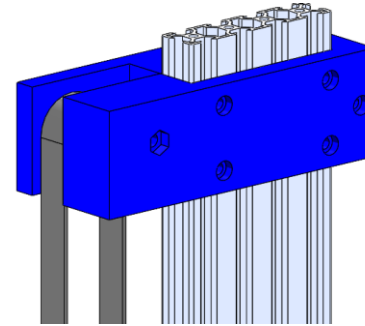
# Diseño Brazo Articulado

## Articulación Prismática

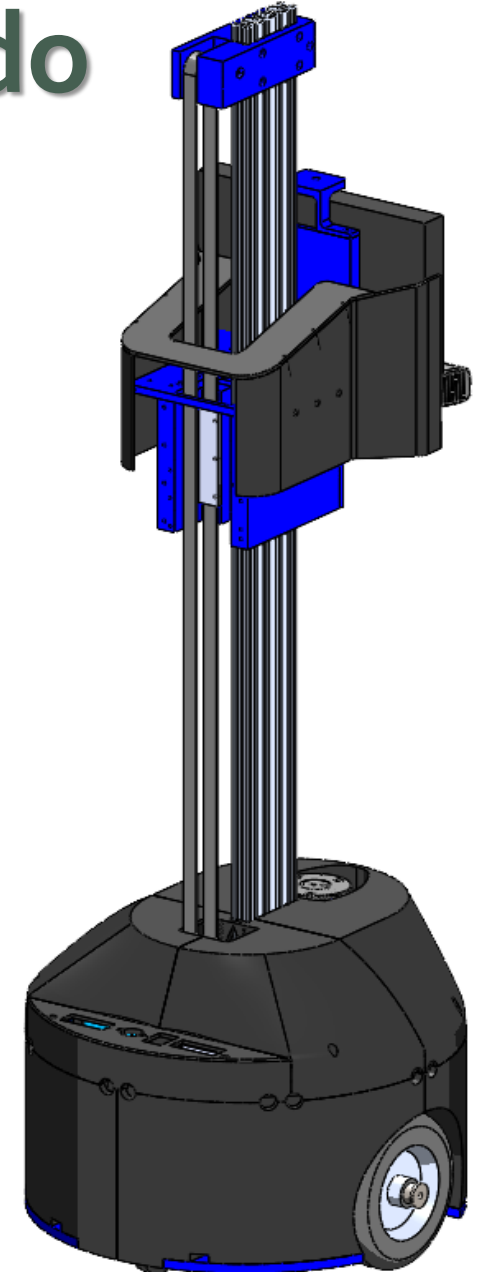
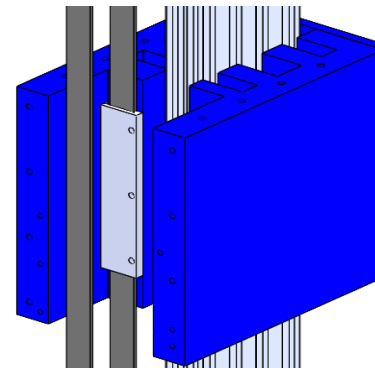
Posición Actuador y Polea  
Conductora



Sistema de tensión con polea  
conducida



Acoplamiento de la base  
Superior



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

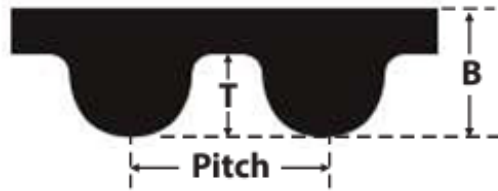
Trabajos futuros



# Diseño Brazo Articulado

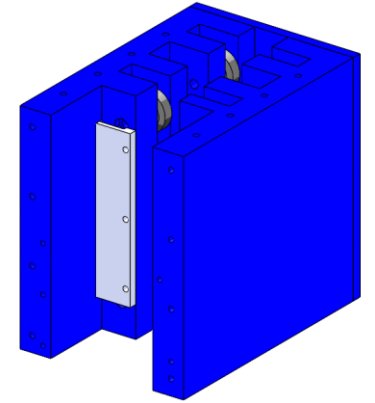
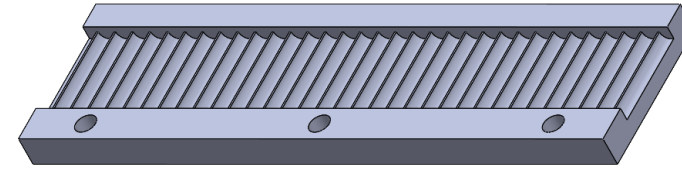
## Articulación Prismática

Correa dentada o Síncrona  
Powergrip HTD



Ref.	Pitch (mm)	T (mm)	B(mm)
3M	3	1,2	2,4
5M	5	2,1	3,8
8M	8	3,4	6,0
14M	14	6,0	10,0
20M	20	8,4	13,2

Elevado regímenes de potencia  
Transmisiones Compactas  
Nada de engrase o lubricación



Elemento	Característica	Imagen
<b>POWERGRID HTD 3M</b>	Perfil Curvilíneo Paso: 3mm Altura: 2.4mm Ancho: 15mm Velocidades hasta 20000rpm Potencia de transmisión max:10kW	
<b>Polea Uxcell</b>	Perfil Curvilíneo Dientes: 20 Diámetro del orificio: varios Paso: 3mm Diámetro exterior: 35mm Ancho: 20mm	
<b>Polea Uxcell</b>	Diámetro del orificio: 0.236 in Ancho: 20mm	

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



# Diseño del Prototipo Propuesto

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

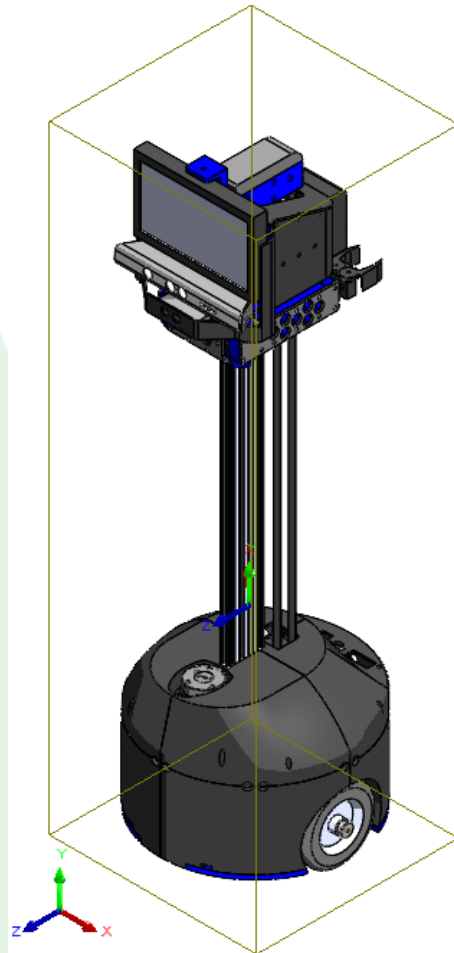
Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



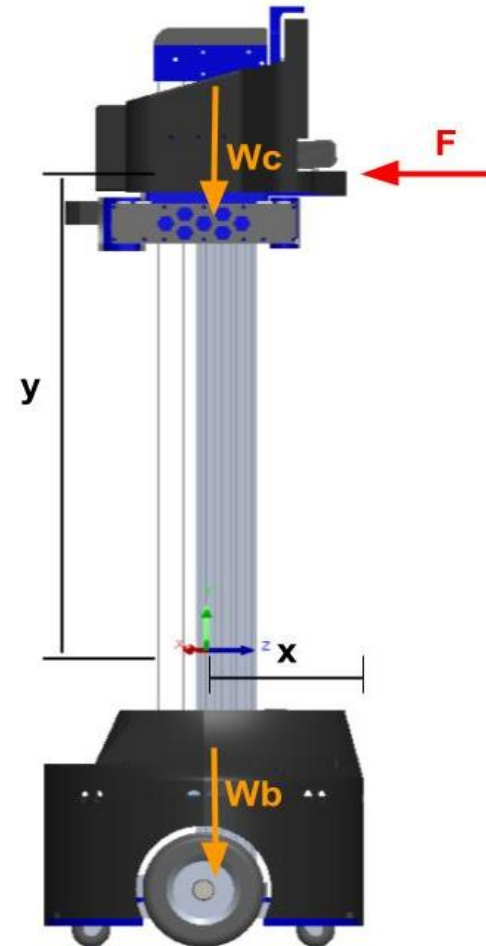
Centro de masa: ( milímetros )

X = -5.53

Y = 414.49

Z = 5.25

## Análisis de Volcamiento



$$F = 10N$$

$$W_c = 39.24N$$

$$W_b = 239.36N$$

$$x = 0.205m \quad y = 0.666m$$

$$M_{est} = W_T * x = 57.11Nm$$

$$M_{vol} = F * y = 6.66Nm$$

$$fs = \frac{M_{est}}{M_{vol}} = \frac{57.11Nm}{6.66Nm} = 8.57$$



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

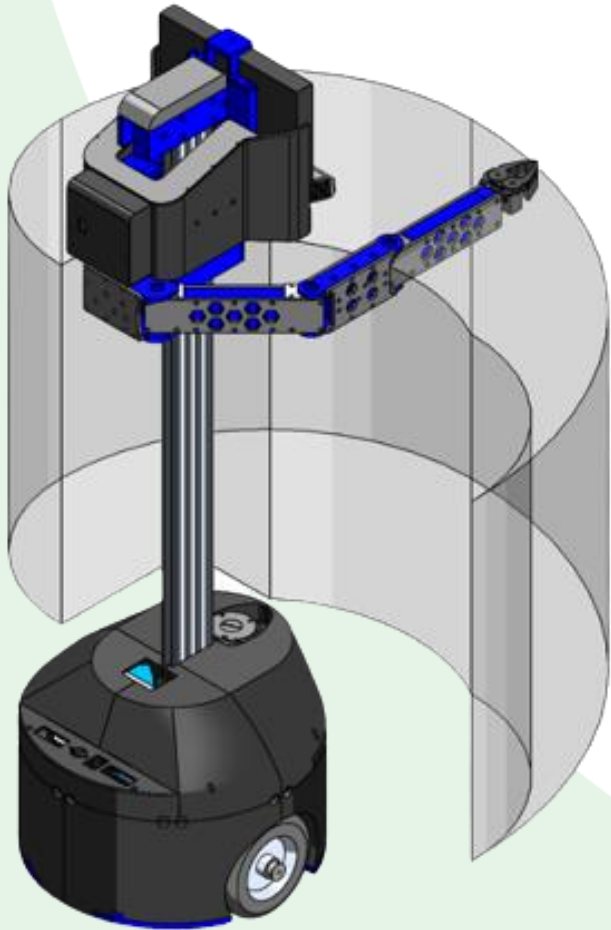
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

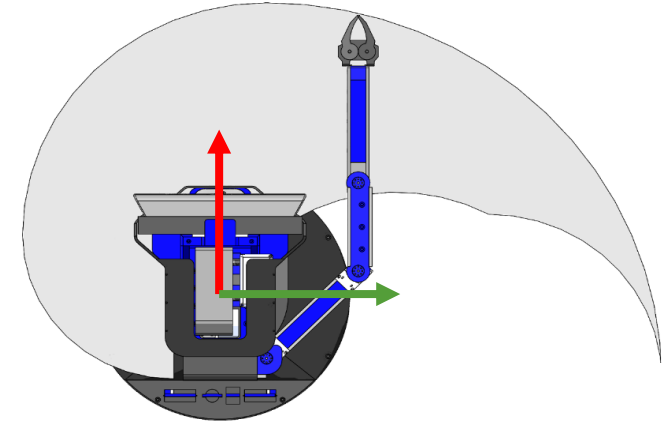
# Espacio de Trabajo

## Diseño Final Concepto



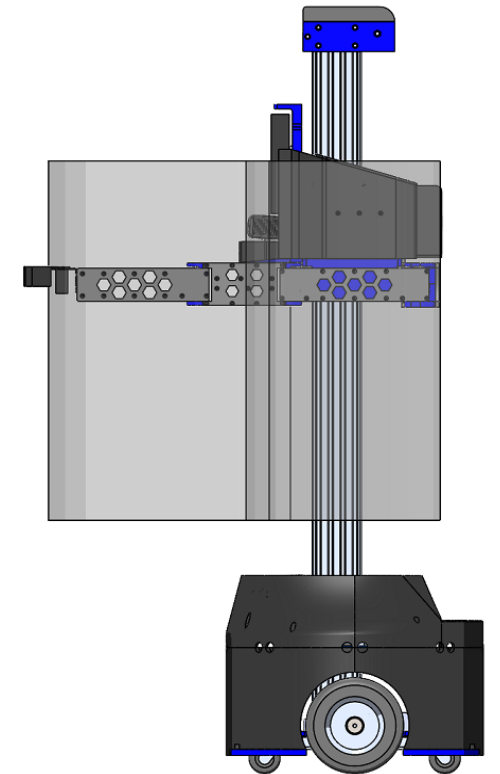
### Plano X-Y

- X=50cm
- Y Der =51cm
- Y Izq =11cm



### Plano X-Z

1m con respecto al  
suelo y 40cm





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Mecánico del Brazo articulado

Cinemática Directa del Brazo Articulado

Parámetros de Denavit - Hartenberg de un manipulador PRRR

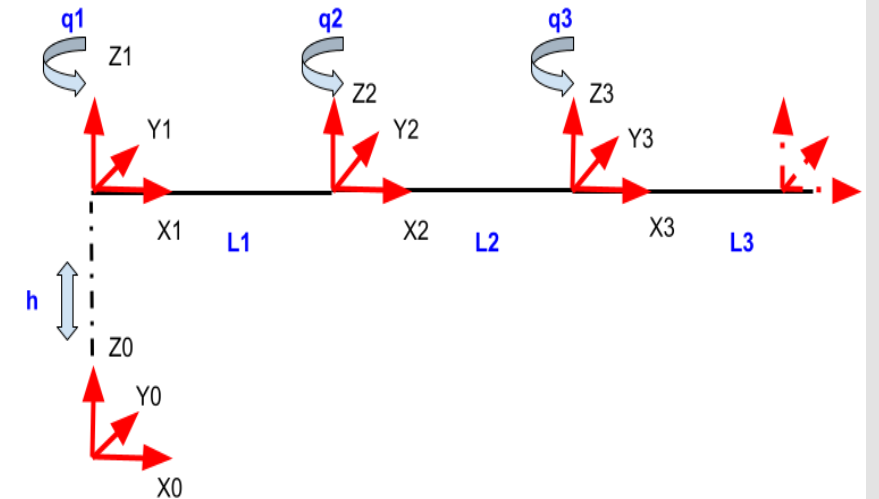
Articulación		$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	$H_0^1$	0	d1	0	0
2	$H_1^2$	q2	0	l1	0
3	$H_2^3$	q3	0	l2	0
4	$H_3^4$	q4	0	l3	0

Matriz de Transformación

$$H_0^4 = \begin{bmatrix} \cos(q_{234}) & -\text{sen}(q_{234}) & 0 & l_1 \cos(q_2) + l_2 \cos(q_{23}) + l_3 \cos(q_{234}) \\ \text{sen}(q_{234}) & \cos(q_{234}) & 0 & l_1 \text{sen}(q_2) + l_2 \text{sen}(q_{23}) + l_3 \text{sen}(q_{234}) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de Posición del efector final

$$\begin{bmatrix} px \\ py \\ pz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_2) + l_2 \cos(q_{23}) + l_3 \cos(q_{234}) \\ l_1 \text{sen}(q_2) + l_2 \text{sen}(q_{23}) + l_3 \text{sen}(q_{234}) \\ d_1 \end{bmatrix}$$



**Configuración PRRR**



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Mecánico del Brazo articulado

Cinemática Inversa del Brazo Articulado

$$X_3 = X_2 + l_3 \cos(\phi)$$

$$Y_3 = Y_2 + l_3 \sin(\phi)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{X_2^2 + Y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{-2l_1 l_2} \right)$$

$$\alpha = \text{atan2}(X_2, Y_2)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{l_2 \sin(\gamma)}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}} \right)$$

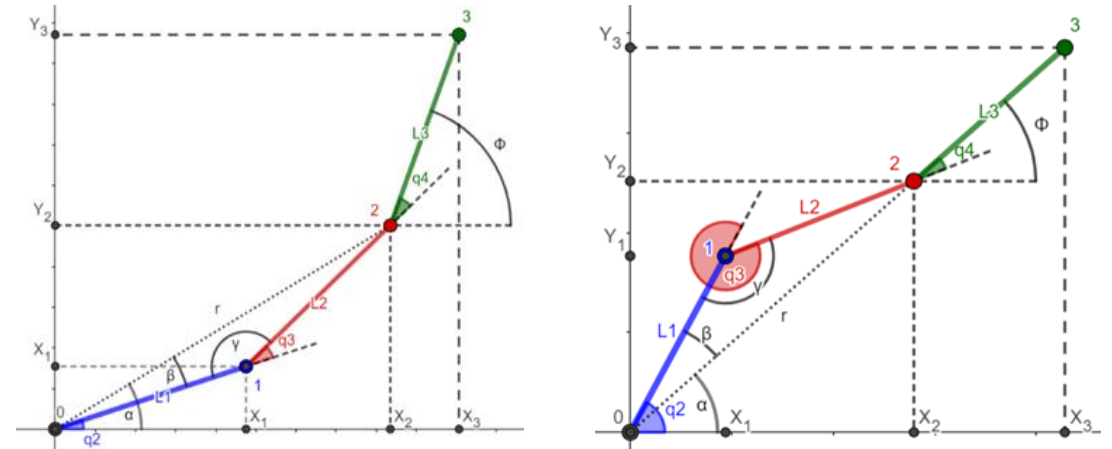
Codo derecho:

$$q_2 = \text{atan2}(X_2, Y_2) + \sin^{-1} \left( \frac{l_2 \sin(\gamma)}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}} \right)$$

$$q_3 = \pi + \cos^{-1} \left( \frac{X_2^2 + Y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{-2l_1 l_2} \right)$$

$$q_4 = \phi - q_2 - q_3$$

Configuración del brazo en plano X-Y



Codo izquierdo:

$$q_2 = \text{atan2}(X_2, Y_2) - \sin^{-1} \left( \frac{l_2 \sin(\gamma)}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}} \right)$$

$$q_3 = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{X_2^2 + Y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{-2l_1 l_2} \right)$$



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Mecánico del Brazo articulado

## Cinemática Inversa del Brazo Articulado

### Matriz Jacobiana

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -l_1 s_2 - l_2 s_{23} - l_3 s_{234} & -l_2 s_{23} - l_3 s_{234} & -l_3 s_{234} \\ 0 & l_1 c_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234} & l_2 c_{23} + l_3 c_{234} & l_3 c_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

### Matriz de velocidad del efector final

$$v = J \cdot \dot{q}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -l_1 s_2 - l_2 s_{23} - l_3 s_{234} & -l_2 s_{23} - l_3 s_{234} & -l_3 s_{234} \\ 0 & l_1 c_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234} & l_2 c_{23} + l_3 c_{234} & l_3 c_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix}$$

### Singularidades

$$|J| = l_1 l_2 \text{sen}(q_2 + q_3) * \cos(q_2) - l_1 l_2 \cos(q_2 + q_3) * \text{sen}(q_2)$$

$$0 = l_1 l_2 \text{sen}(q_2 + q_3) * \cos(q_2) - l_1 l_2 \cos(q_2 + q_3) * \text{sen}(q_2)$$

$$q_3 = 0$$

### Matriz de velocidades articulares

$$\dot{q} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} v_z \\ \frac{v_x c_{23} + v_y s_{23} + l_3 \omega_z s_4}{l_1 s_3} \\ \frac{l_1 v_x c_2 + l_1 v_y s_2 + l_2 v_x c_{23} + l_2 v_y s_{23} + l_1 l_3 \omega_z s_{34} + l_2 l_3 \omega_z s_4}{l_1 l_2 s_3} \\ \frac{v_x c_2 + v_y s_2 + l_2 \omega_z s_3 + l_3 \omega_z s_{34}}{l_2 s_3} \end{bmatrix}$$



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Mecánico del Brazo articulado

## Dinámica del Brazo Articulado

Euler - Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau$$

$$L = K - P$$

Eslabón	Valor
L1	0.2172 m
L2	0.14883 m
L3	0.2172 m

Eslabón	Masa
d1	1.814 kg
q2	0.1873 kg
q3	0.036 kg
q4	0.1873 kg

Gripper & Payload	Masa
Gripper (Garra)	0.13 kg
Payload (Carga)	510.

Articulación	Centro de masa (m)		
	x	y	z
1	0	0	0.1645
2	0.1086	-0.0000434	0.00085831
3	0.07441308	0	-0.0007572
4	0.1086	-0.0000434	0.00085831

Eslabón 1 Prismático			
0.07918	0.00005	0.01852	0.044098
0.00005	0.09138	0.00003	0.000145
0.01852	0.00003	0.04658	0.172022
0.04409834	0.00014512	0.17202162	1.814

Eslabón 2 Revoluta			
0.00019	0	0	0.020322
0	0.00922	0	0
0	0	0.00914	0
0.02032205	0	0	0.1873

Eslabón 3 Revoluta			
0.00014	0	0	0.002714
0	0.00183	0	0
0	0	0.00174	0
0.00271446	0	0	0.036063

Eslabón 4 Revoluta & Gripper & Object			
0.00115	-0.00041	-0.00057	0.168132
-0.00041	0.05993	0.00001	-0.00106
-0.00057	0.00001	0.05956	-0.00146
0.16813218	-0.00105894	-0.001456	0.8273

Resolución matricial Euler-Lagrange (Barrientos, Cruz 2007)

$$\tau = D\ddot{q} + H + C$$





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

**Diseño y  
construcción**

Pruebas y  
Resultados

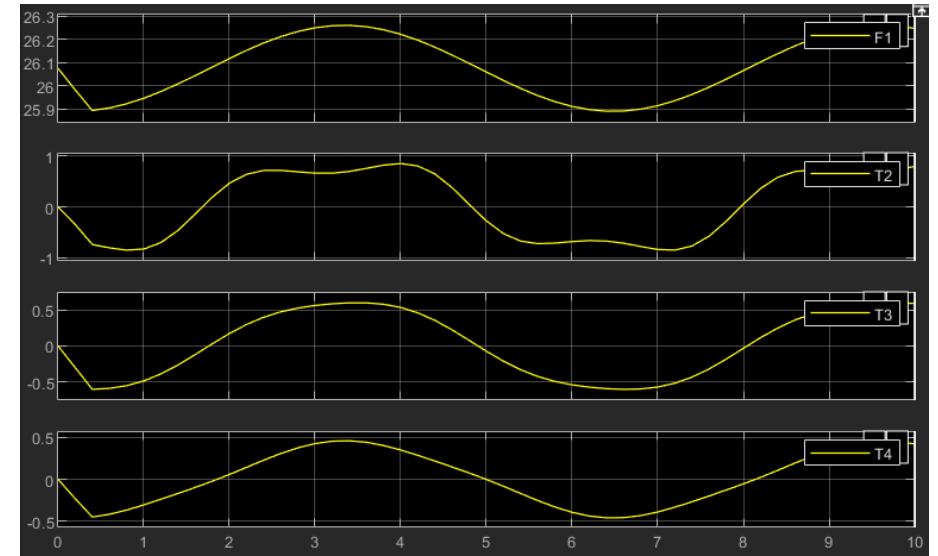
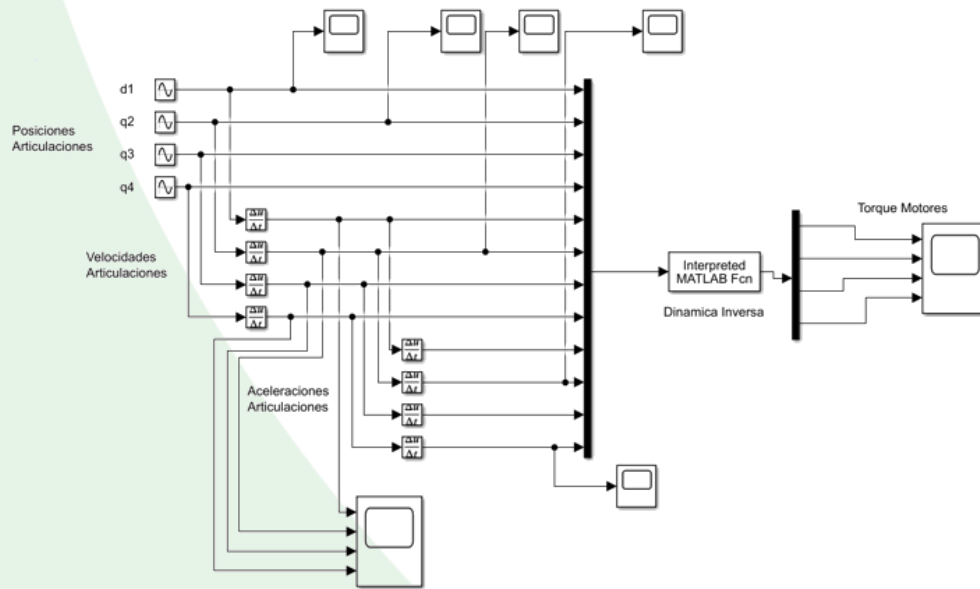
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Mecánico del Brazo articulado

## Dinámica Inversa del Brazo Articulado



FS: 1.6 = 60%

Fuerzas y torques con objeto de carga (payload)

Torque Máx	Valor
F1	26.26 Nm
T2	0.8392 Nm
T3	0.5963 Nm
T4	0.4550 Nm

Fuerzas y torques con carga aplicado factor de seguridad

Torque Máx	Valor
T1	42.01 Nm
T2	1.3427 Nm
T3	0.9540 Nm
T4	0.7280 Nm



# Subsistema Electrónico

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

## Actuador Prismático



**Motor a Pasos NEMA23  
Gearbox STEPPERONLINE**

60Nm

24V

2.8A

1.6kg

158x60x60mm

## Actuador para juntas rotacionales



**LewanSoul Hiwonder  
LX-16**

17 Kg-cm

7.4 V

3 A

52 gr.

## Unidad de Procesamiento para el sistema



**Jetson Nano Developer Kit**

Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz

128-core Maxwell

4GB 64-bit

5V 3A

Gigabit Ethernet, M.2 Key E

119x97x36mm



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados


Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

## Otros Componentes Electrónicos

# Subsistema Electrónico

Componente	Características	Imagen
<b>Arduino Uno</b>	Microcontrolador: ATmega328P. Velocidad de reloj: 16 MHz. Voltaje de trabajo: 5V. Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos. 1 puerto serie por hardware. Memoria: 32 KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom.	
<b>Digital Stepper Driver</b>	Controlador de motor DM542T (V4) Selector de voltaje lógico de 5 V/24 V Corriente de salida: 1,0 ~ 4,2 A, Voltaje de Alimentación: 20 ~ 50 VCC, Resolución de micropasos: 1/128 Frecuencia entrada de pulsos: 200kHz	
<b>Bus Linker</b>	Conector de servomotor de bus serial. Protocolo de comunicación serial asíncrona UART Dos modos de trabajo: modo Servo y modo de motor de engranaje. Retroalimentación de posición, temperatura y voltaje.	



# Subsistema de Visión Artificial

## Sensor para visión artificial

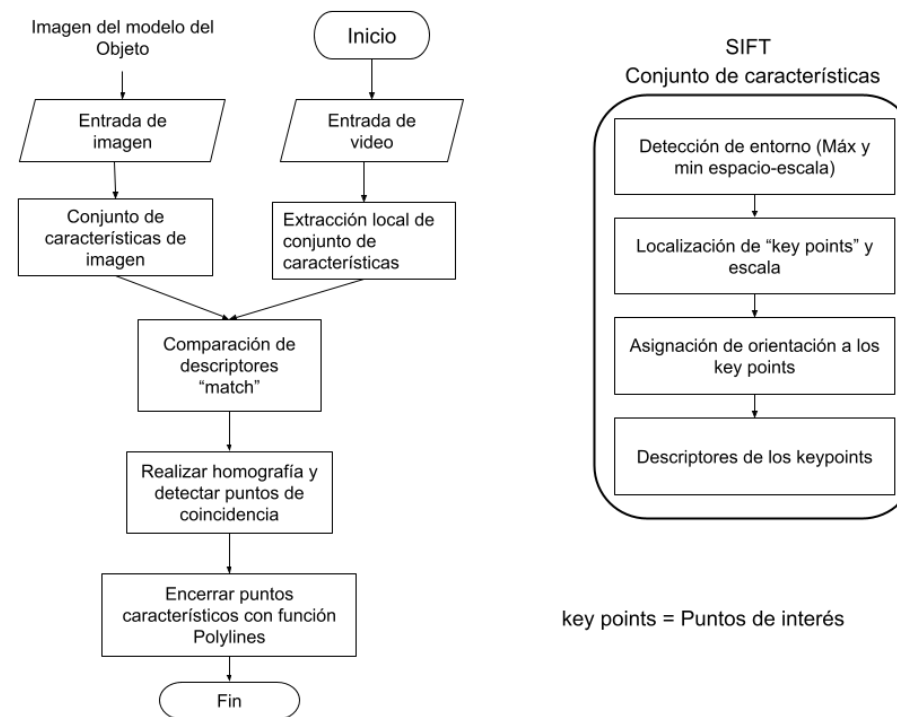
Características	Datos
Resolución de video	640*320
Píxeles efectivos	720p
Velocidad de fotogramas de video	30 fps
Formato de codificación de video	MJPEG
Distancia efectiva de recogida	16.4 ft
Tipo cámara	RGB



## SIFT

- Extrae características invariantes distintivas de imágenes .
- Coincidencias confiables entre distintas vistas de un objeto o escena.

## Algoritmo de visión artificial



## Aspectos de robustez

- Variaciones de iluminación
- Variaciones de escala
- Cambios de rotación y oclusión

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



# Subsistema de Visión Artificial

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Objetos de detección



Algoritmo de visión artificial

Modelo 1



Modelo 2



Modelo 3



Características del objeto modelo determinado

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Altura	24 cm
Ancho	6 cm
Radio	3 cm
Peso (lleno)	510 gr
Peso (vacío)	10 gr

Características	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Pixeles	122 x 397	119 x 382	126*455
Formato	jpeg	jpeg	jpeg
Bits por pixel	24-bit color	24-bit color	24-bit color
Keypoints detectados	207	189	275



ECUADOR

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

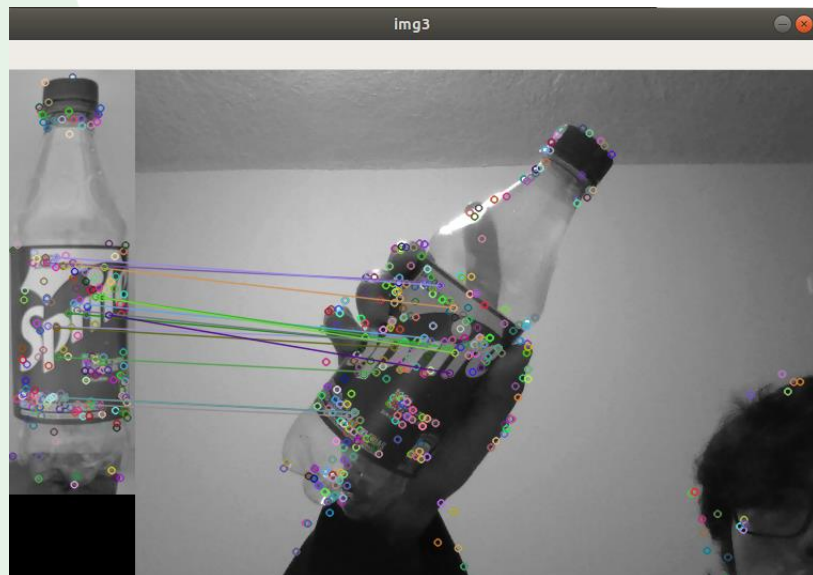
Conclusiones

Recomendaciones

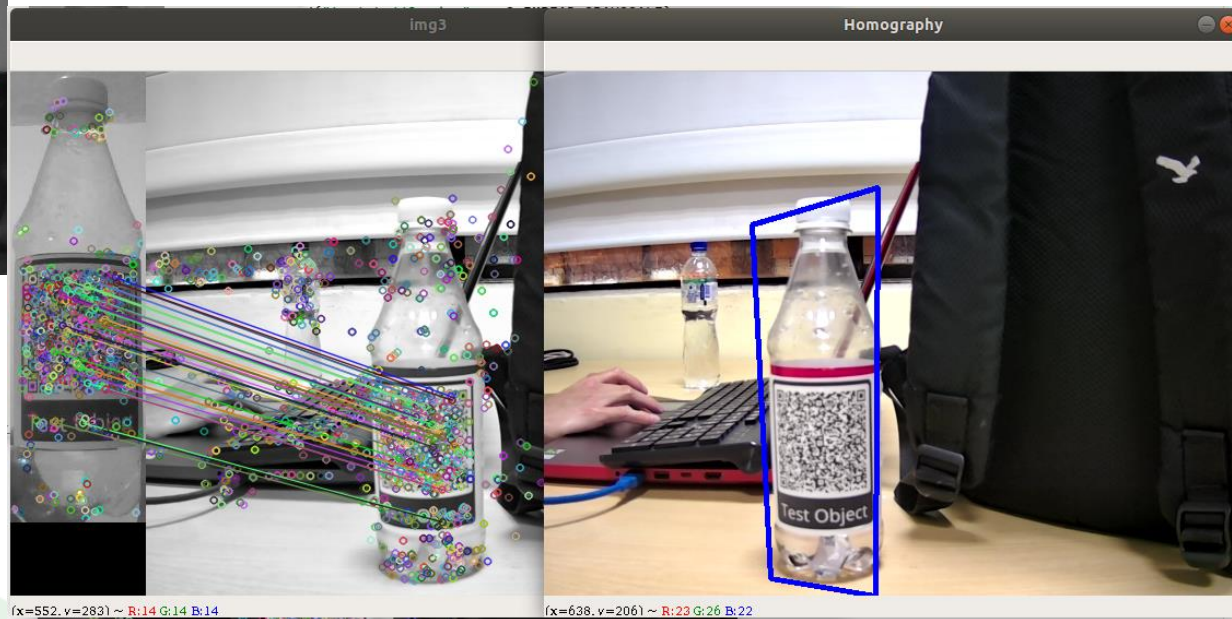
Trabajos futuros

# Subsistema de Visión Artificial

Algoritmo de visión artificial



Identificación de puntos coincidentes del modelo con el objeto en video





# Subsistema de Visión Artificial

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

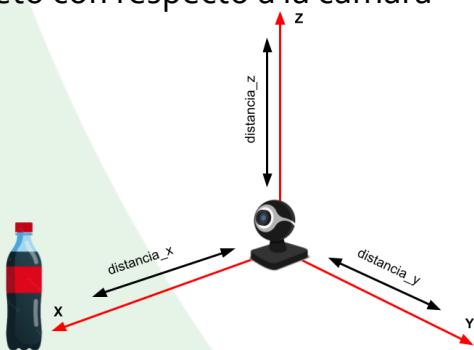
Conclusiones

Recomendaciones

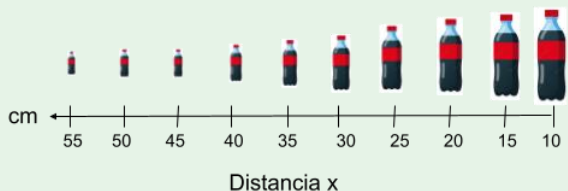
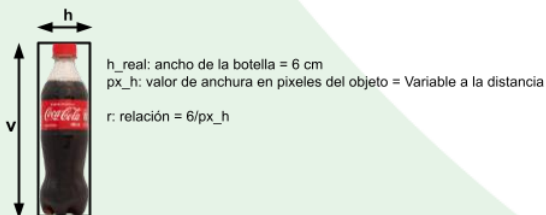
Trabajos futuros

## Estimación de posición (Distancia X)

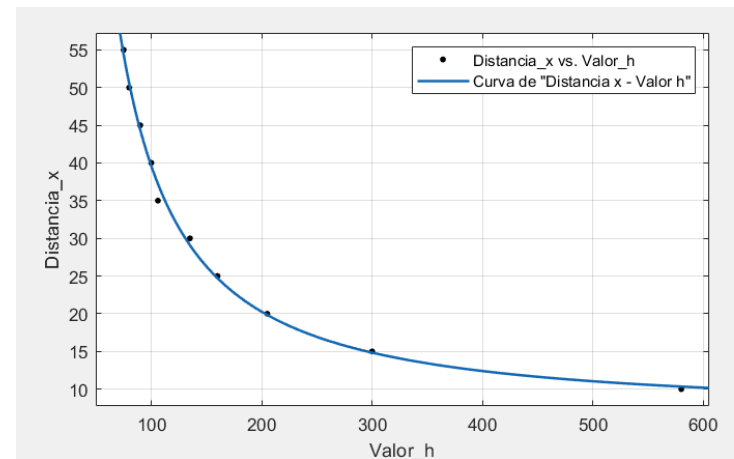
Orientación de distancias del objeto con respecto a la cámara



Distancia x : distancia frontal con respecto a la cámara  
 Distancia y : distancia lateral horizontal respecto a la cámara  
 Distancia z : distancia lateral vertical con respecto a la cámara



Valor h (pixels)	Distancia de la botella (cm)
580	10
300	15
205	20
160	25
135	30
106	35
100	40
90	45
80	50
75	55



Results

General model Power2:  
 $f(x) = a \cdot x^b + c$

Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 a = 1.289e+04 (265.6, 2.552e+04)  
 b = -1.299 (-1.536, -1.061)  
 c = 7.008 (3.405, 10.61)

Goodness of fit:  
 SSE: 7.302  
 R-square: 0.9965  
 Adjusted R-square: 0.9954  
 RMSE: 1.021

$$f(x) = 12890 * x^{-1.299} + 7.008$$

$$R^2 = 0.9965$$



# Subsistema de Visión Artificial

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

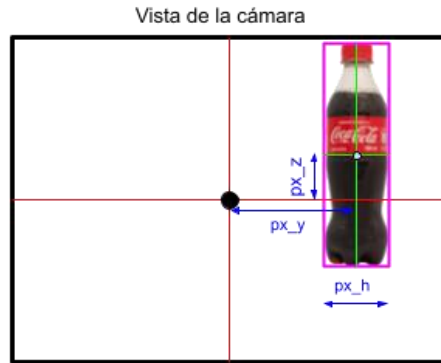
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

## Estimación de posición (Distancia Y y Z)



$h_{real}$ : ancho de la botella (objeto real) = 6 cm

$px_h$ : valor de anchura de píxeles = Variable a la distancia

$px_z$ : distancia vertical desde el centro de la cámara al punto central del objeto

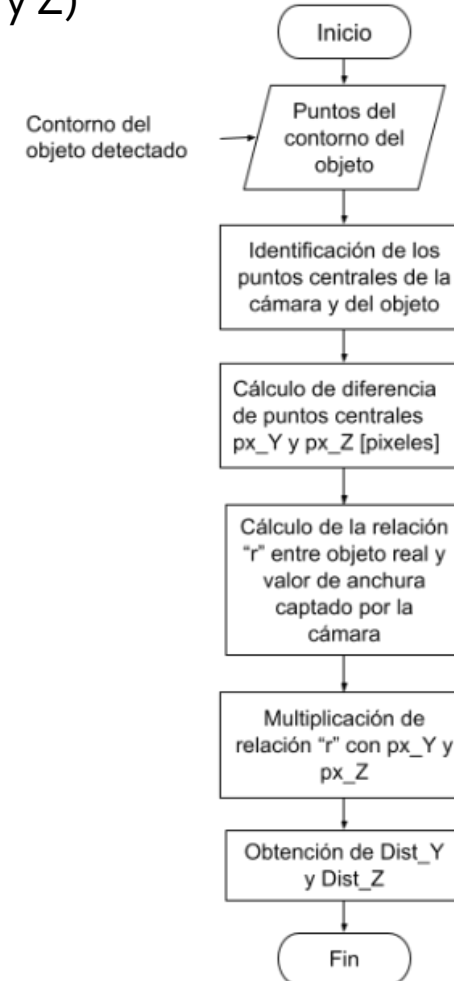
$px_y$ : distancia horizontal desde el centro de la cámara al punto central del objeto



$$r = \frac{h}{px_h} = \frac{6 [cm]}{px_h [píxeles]}$$

$$px_y [píxeles] * r \left[ \frac{cm}{píxeles} \right] = Distancia_Y [cm]$$

$$px_z [píxeles] * r \left[ \frac{cm}{píxeles} \right] = Distancia_Z [cm]$$







Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

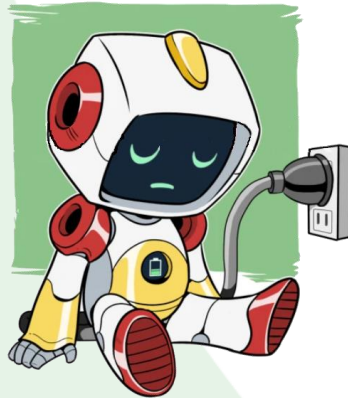
Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema de Energía y Alimentación

Consumo energético del sistema y selección de batería

RECHARGE



Componente	Cantidad	Voltaje	Consumo Energético [A]	Consumo Energético Total [A]
Motor Prismático	1	24V	2.8	2.80
Controlador Motor	1	20-50V	0.7	0.70
Actuador rotacional	3	7.4V	1.0	3.00
Actuador Efecto Final	1	6V	1.1	1.10
			SUMA	7.60
			FACTOR 10%	0.76
			TOTAL	8.36

Alternativa	Voltaje	Capacidad	Peso	Costo	Tiempo de carga	SUMA	Pond.
Batería Powest Plomo-Ácido	0.092	0.117	0.083	0.117	0.090	0.499	2
Batería Lipo Tcbworth	0.092	0.083	0.117	0.083	0.126	0.501	1





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema de Energía y Alimentación

## Autonomía

### Limitada capacidad de amperaje

Para la Batería de 11.1V 5000mAH:



$$t1 = \frac{5000mAH}{(2800 + 700)mA} = 1,42Horas = 1H25min$$

Para la Batería de 7.4V 3500mAH:



$$t2 = \frac{3500mAH}{(3000 + 1100)mA} = 0.85H = 51min$$



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

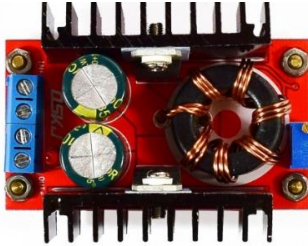

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema de Energía y Alimentación

## Reguladores de Voltaje

Componente	Característica	Imagen
<b>Regulador DC Step Up</b>	Voltaje entrada: 10 V-32 V. Tensión de salida: 12V-35V Corriente de salida: 10A Corriente de entrada: 16A Potencia de salida: 100 W Eficacia de conversión: 94%	
<b>Regulador DC Step Down</b>	Voltaje entrada: 8 V a 36 V, Voltaje salida: 1.25 V a 32 V Corriente 5 A 180 kHz, eficiencia 96%.	



# Subsistema de Control ROS

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

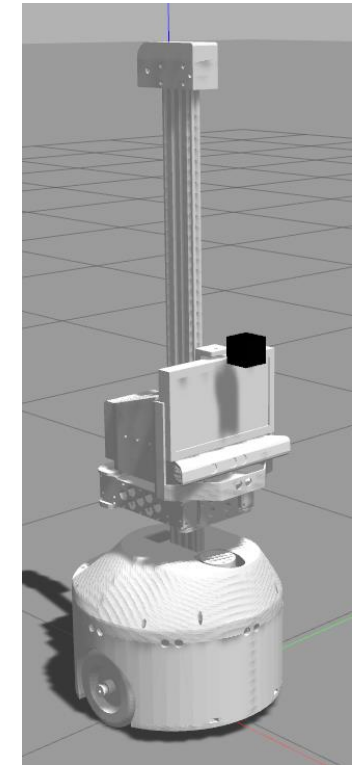
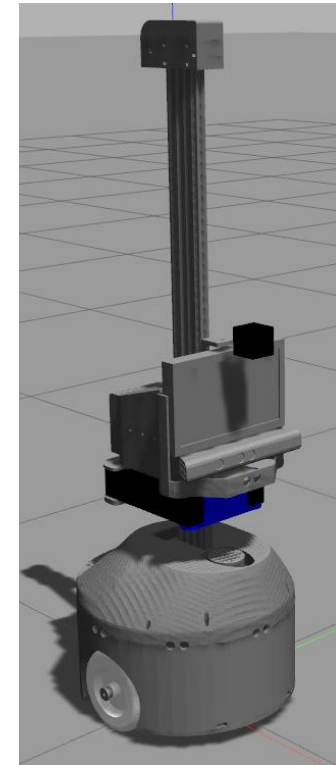
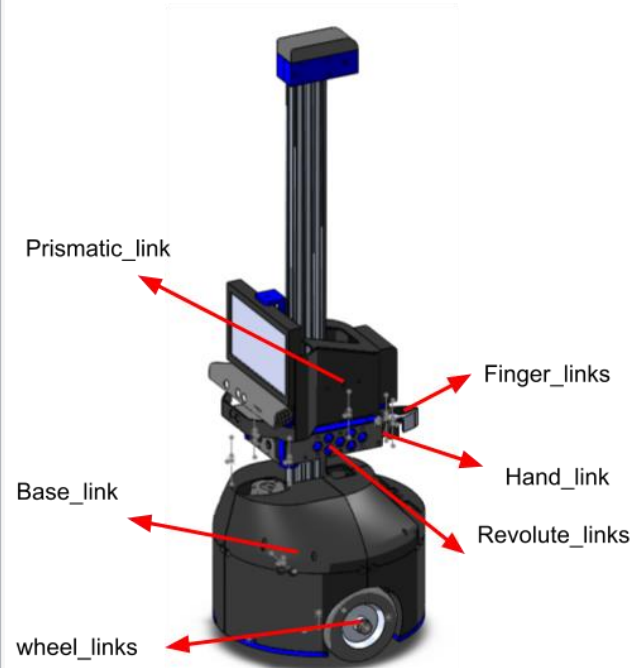
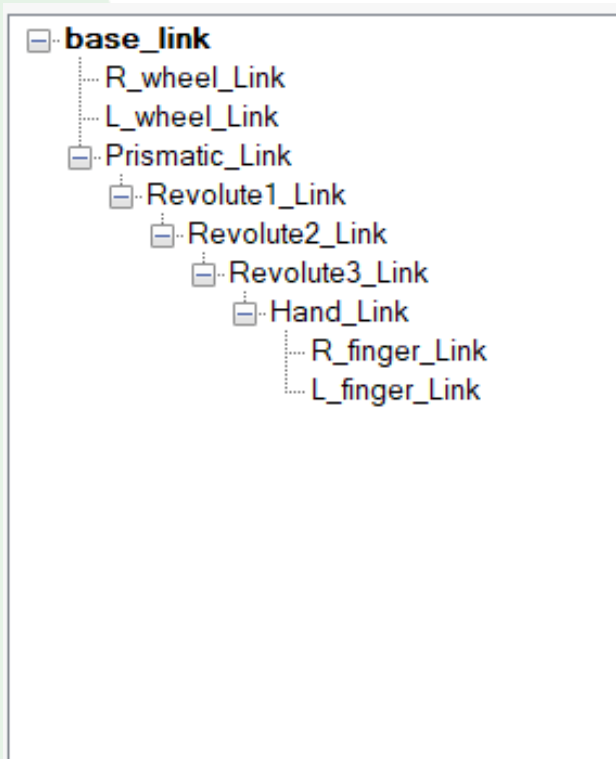
Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

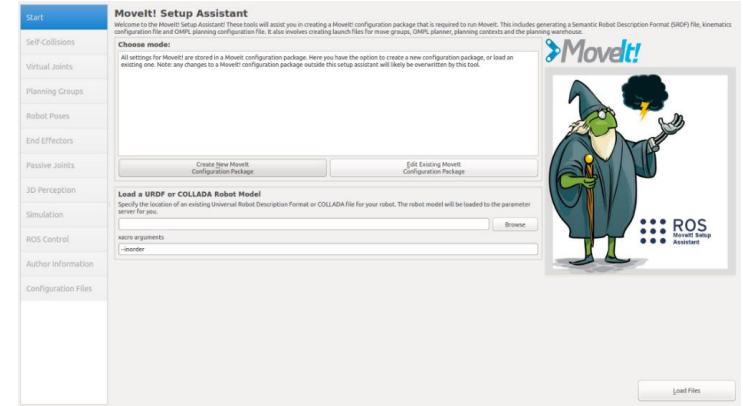
Modelo estructural URDF





# Subsistema de Control ROS

## Configuración MoveIt ROS



### Lineamientos del modelo URDF del robot

Parámetros de movimiento	Configuración
Articulación 1 Prismática	Límites de movimiento: 0 a 0.615 [m]
Articulación 1 Revolución	Límites de movimiento: -1.5708 a 0 [rad]
Articulación 2 Revolución	Límites de movimiento: -0.785 a 1.5708 [rad]
Articulación 3 Revolución	Límites de movimiento: -0.785 a 1.5708 [rad]

Juntas virtuales	Configuración
virtual_joint	Tipo de junta: Planar Trama parental: world (plataforma base) Eslabón hijo: base_link (base móvil)

Grupos de panificación	Configuración
Atom_arm	Joints: Prismatic_joint Revolute_joint1 Revolute_joint2 Revolute_joint3
Atom_hand	Joints: Hand_joint R_finger_joint L_finger_joint

Posiciones	Configuración
Home	Prismatic_joint: 0 mm Revolute_joint1: 0 grados Revolute_joint2: 90 grados Revolute_joint3: 90 grados

Efectores Finales	Configuración
atom_eef	Grupo: atom_hand eslabón parental: Revolute_link3

Control ROS	Configuración
Atom_arm_controller	Controladores de posición/controlador de posición de articulaciones
Atom_hand_controller	Controladores de posición/controlador de posición de articulaciones

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



# Subsistema de Control ROS

Sistema TF y configuración de trayectoria en ROS

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

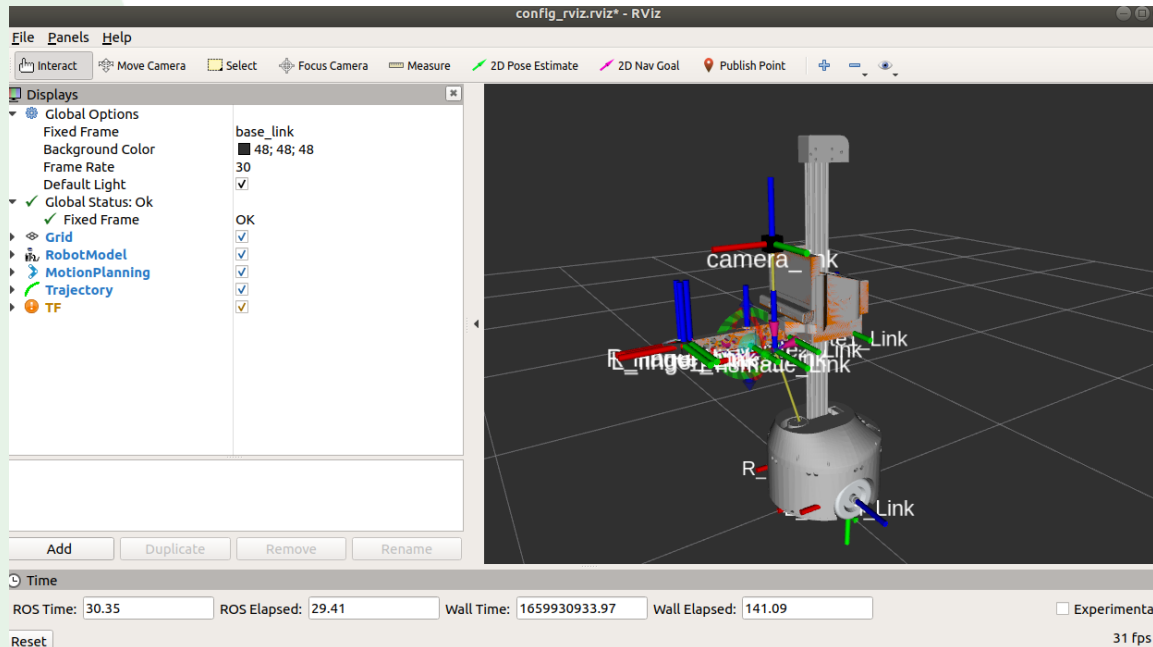
Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

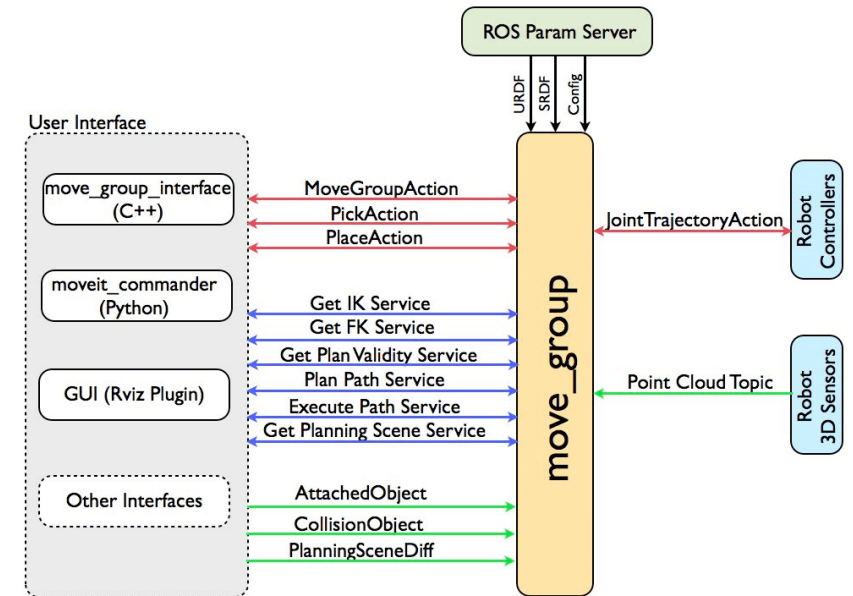
Recomendaciones

Trabajos futuros

Sistema TF del robot manipulador



Arquitectura de nodo "move\_group" en ROS



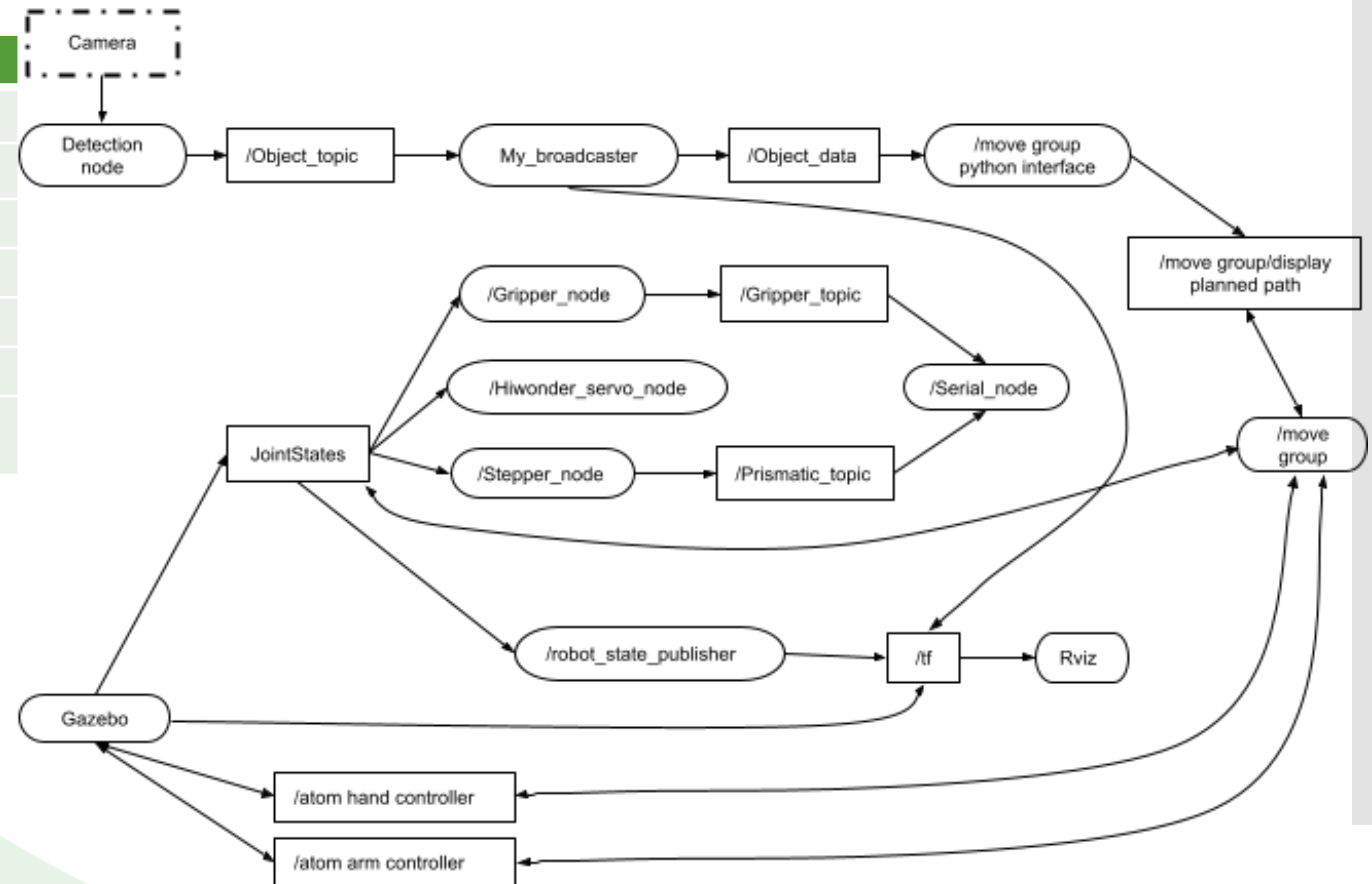


# Subsistema de Control ROS

Nodos y tópicos desarrollados para el control Pick and Place

Nodes/Topics Pick and Place Application

Nodo	Tópico
Hiwonder_servo_node	Lx16a_servo_conection_topic
Stepper_node	Prismatic_topic
Gripper_node	Gripper_topic
Serial_node	Ros_serial_python
Detection_node	Object_topic
My_broadcaster	Object_data
Move_group_python_in terface	Move_group/display_planned_path



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

**Diseño y  
construcción**

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



# Subsistema de Control ROS

Aplicación de Pick and Place en ROS

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

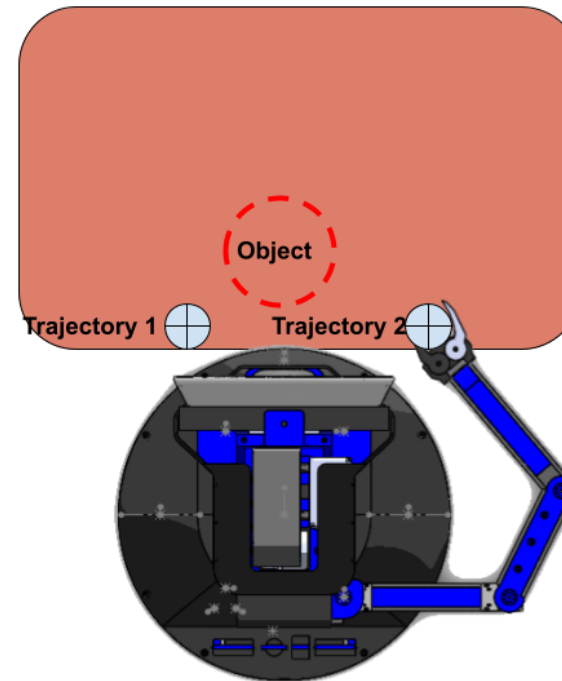
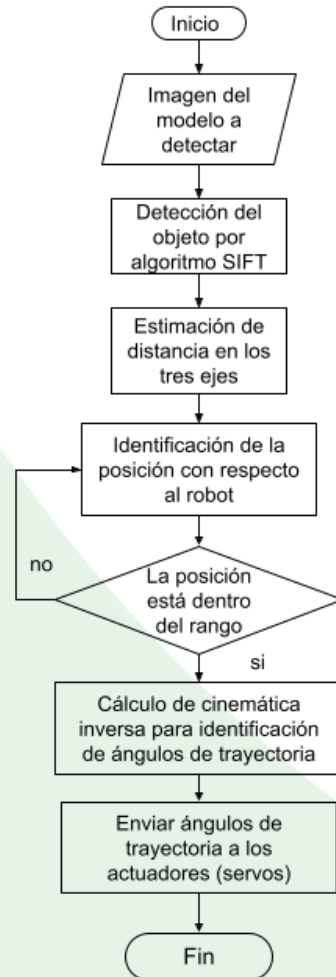
Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros







ECUADOR

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

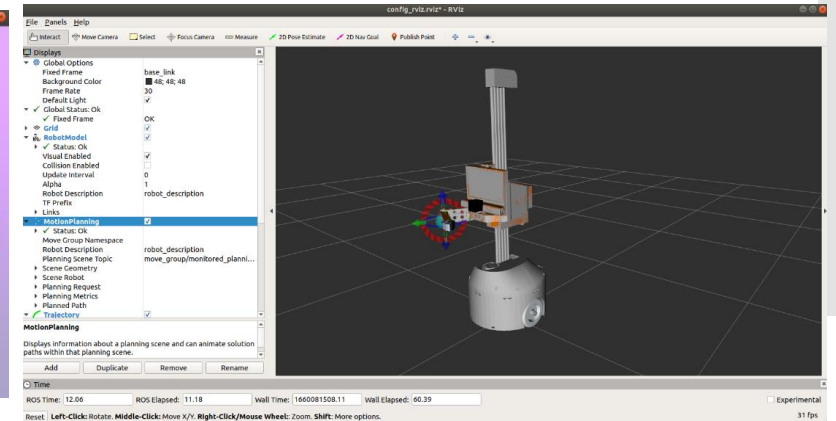
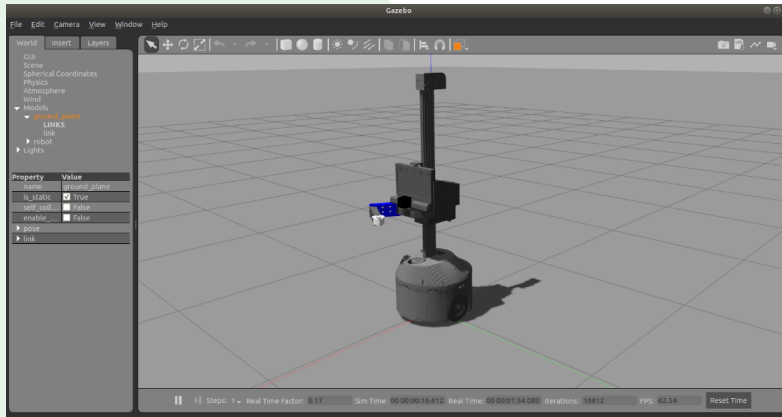
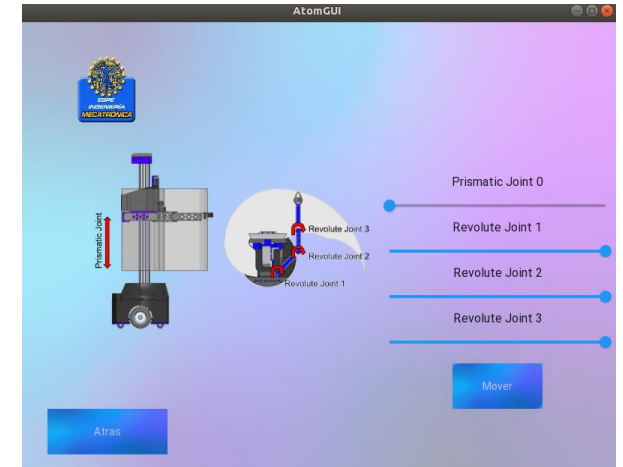
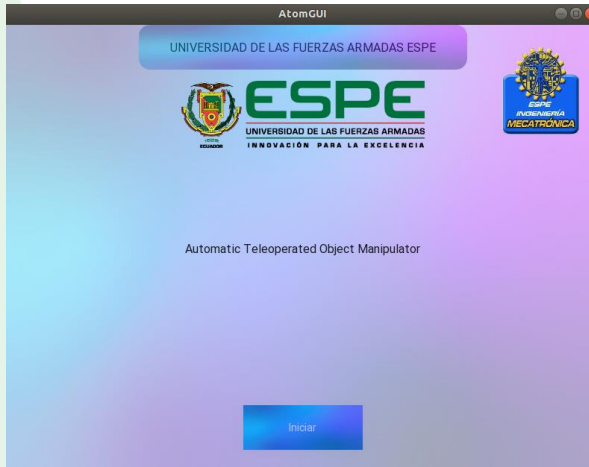
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Subsistema Interfaz HMI

## Diseño y Distribución





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

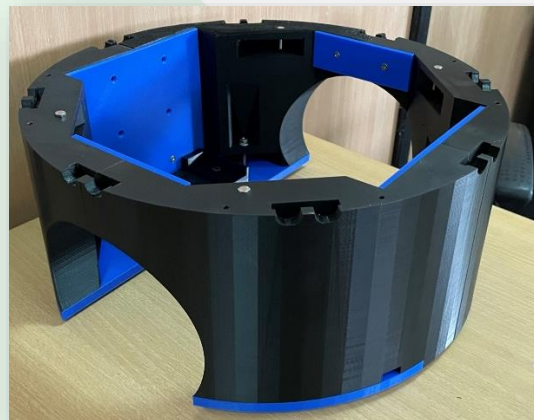
Trabajos futuros

# Implementación

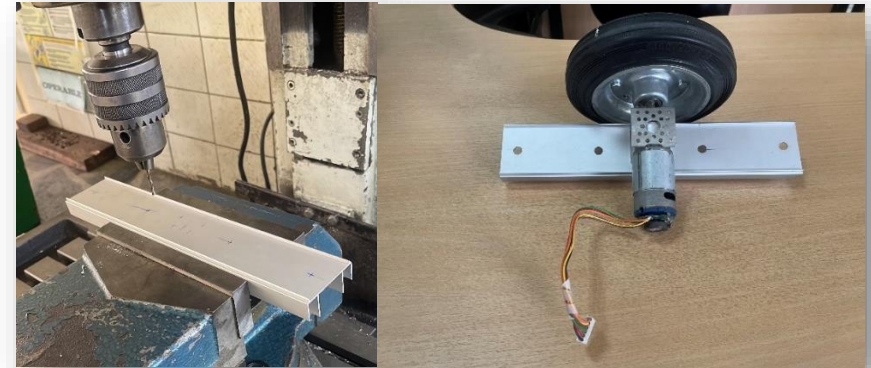
## Impresión 3D



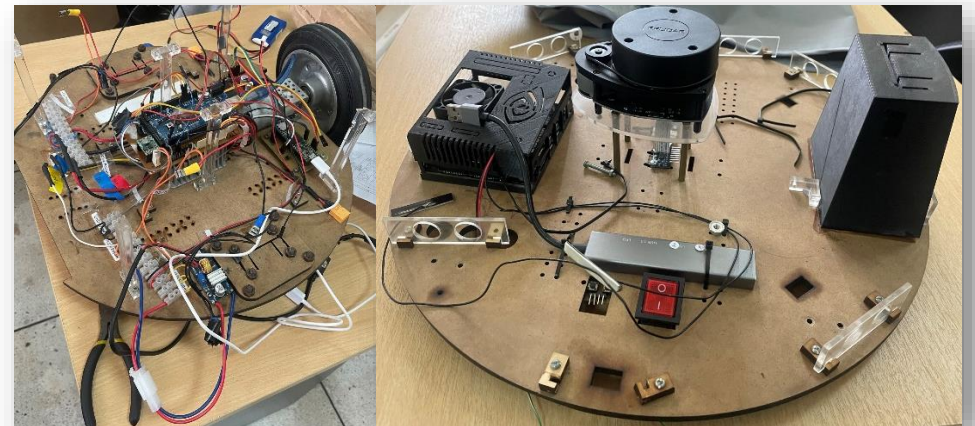
## Armado de Base Diferencial



## Proceso de Taladrado



## Desmontaje de componentes del prototipo anterior





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

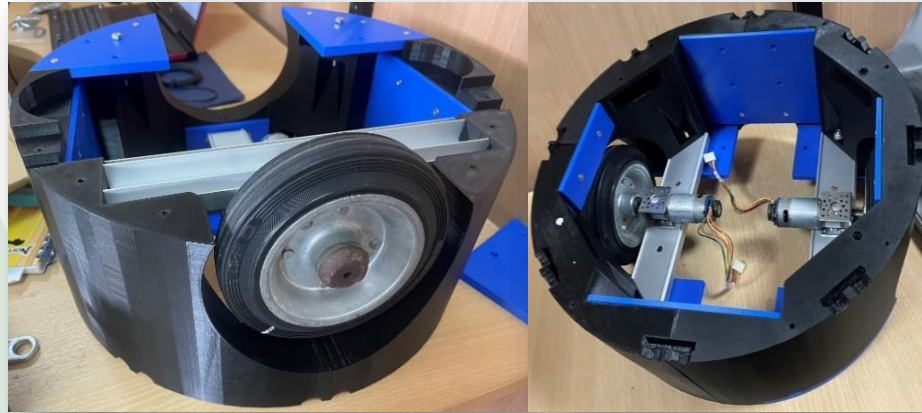
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Implementación

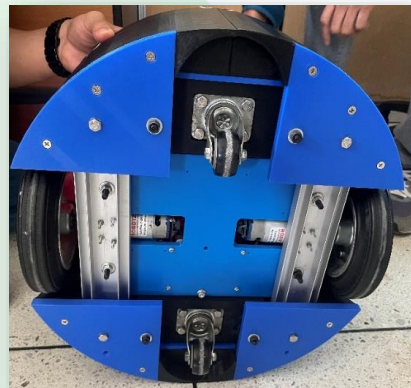
**Ensamble y Montaje de tracción  
Diferencial**



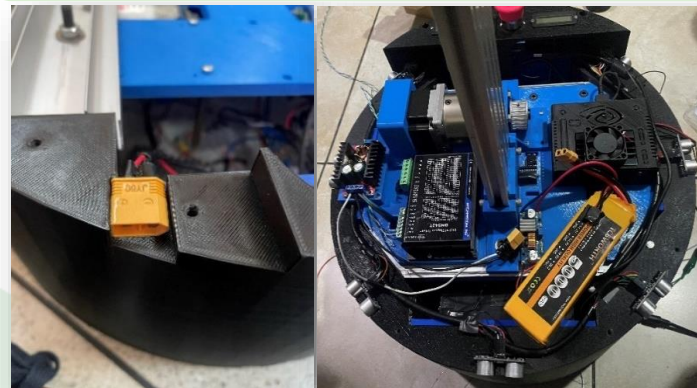
**Nueva estructura para el  
sistema de Telepresencia**



**Acople Ruedas**



**Conexiones y montaje de  
componentes electrónicos**





# Implementación

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

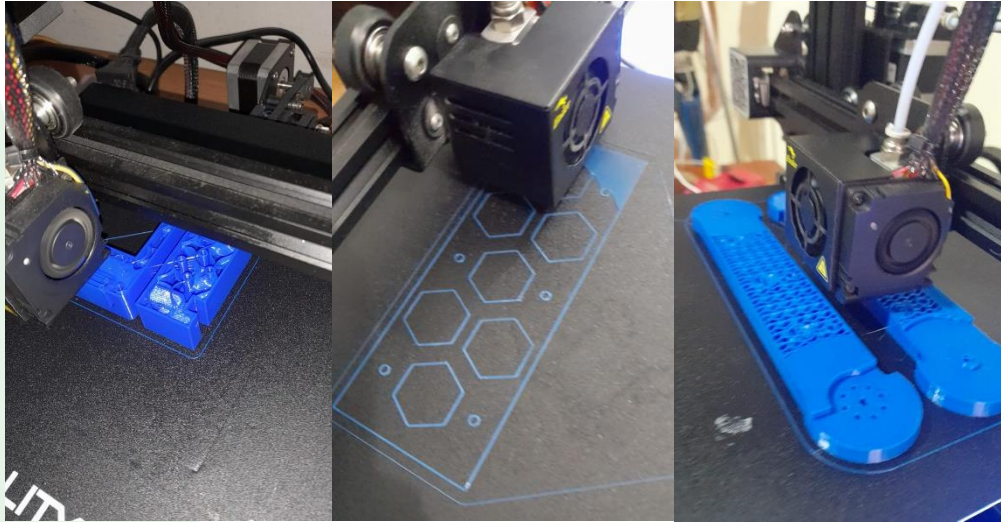
Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



**Impresión de Eslabones**

**Brazo Manipulador Armado**





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Diagrama de Conexión

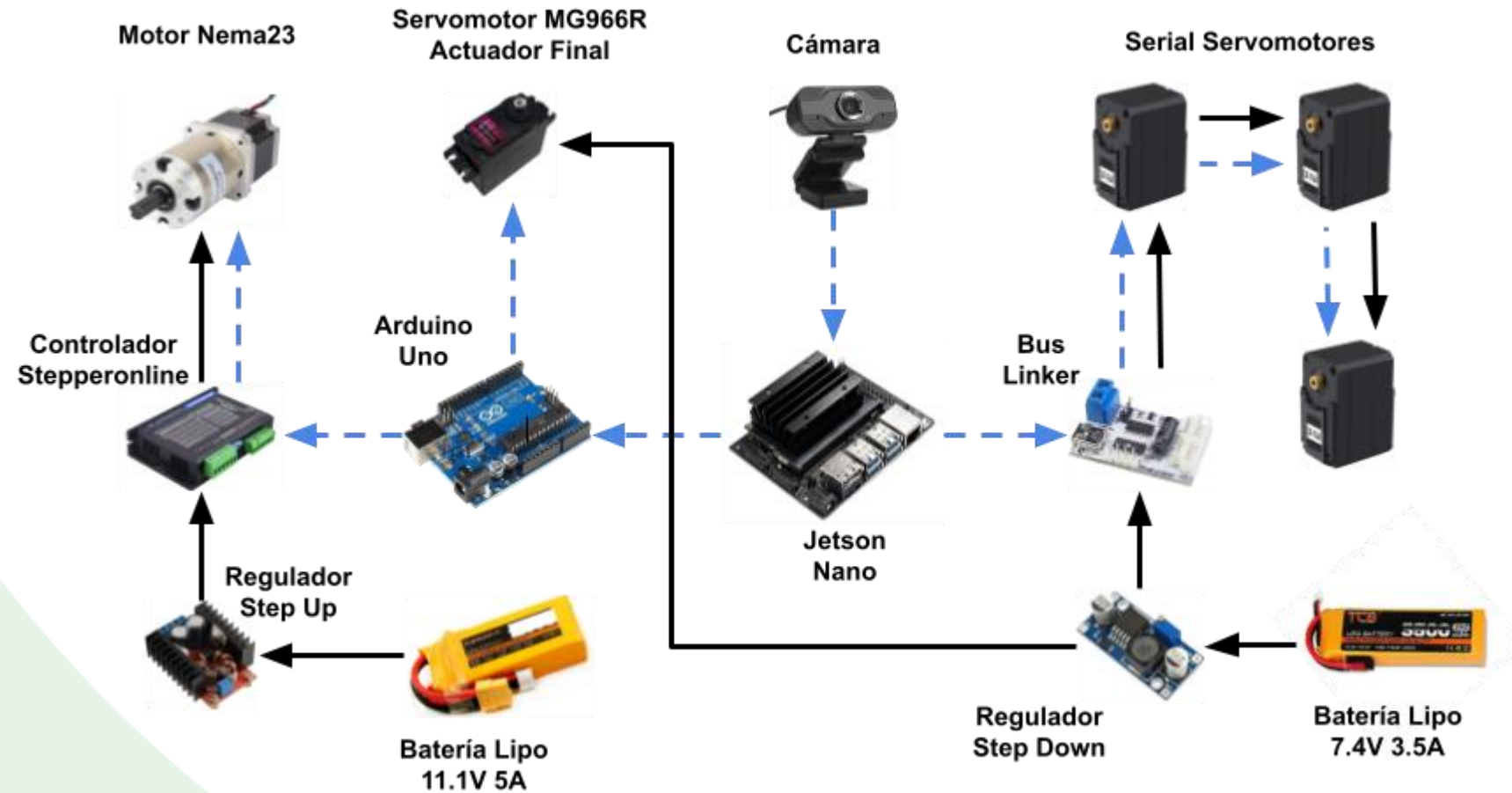
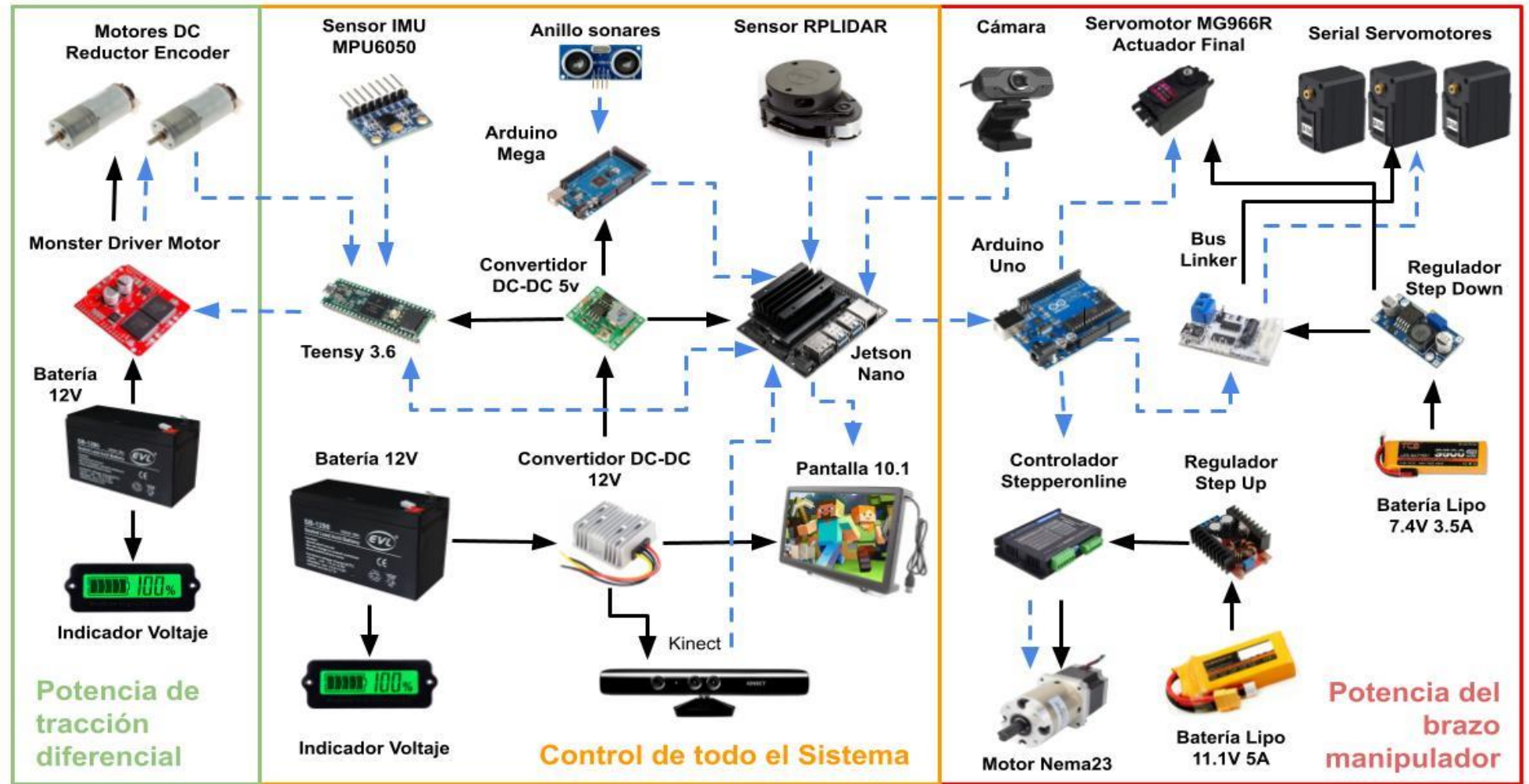


Diagrama de conexión de los componentes para el control del brazo manipulador



# Diagrama de Conexión



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Diagrama de conexión de todo el sistema robótico



# Prueba del Sistema

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

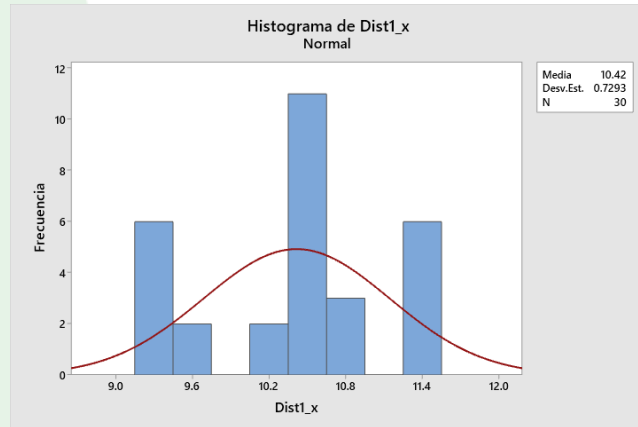
**Pruebas y  
Resultados**

Conclusiones

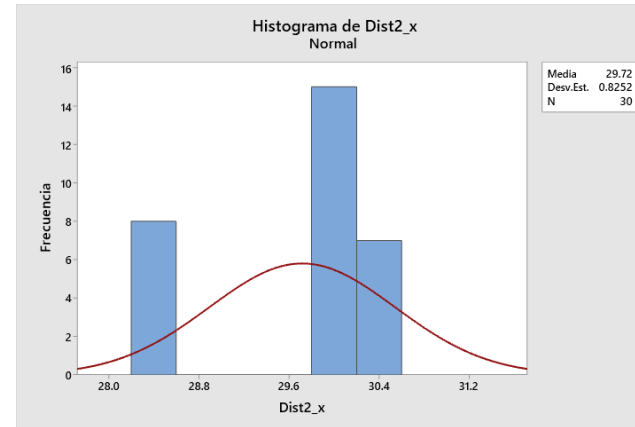
Recomendaciones

Trabajos futuros

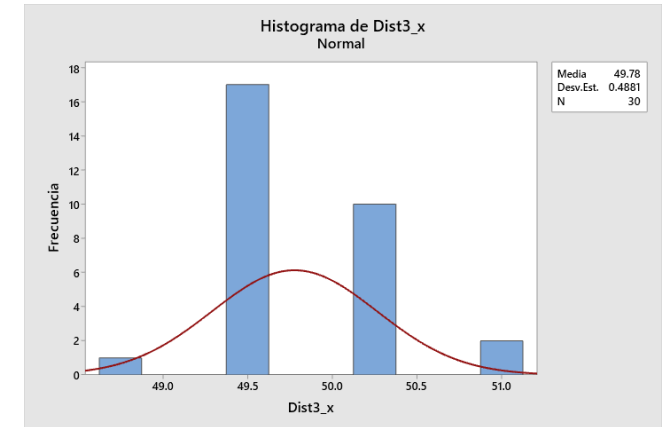
Dist 1



Dist 2



Dist 3



	Distancia Frontal a la Cámara (Eje X)									
Distancia real	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
Desviación estándar	0.7273	0.186584	0.403362	0.132247	0.8252	0.211536	1.14428	0.457321	0.4978	
Media	10.42849	15.83201	20.19224	24.47981	29.72225	33.89132	40.18813	45.28377	49.78504	
Error Absoluto	0.338486	0.832009	0.192241	0.520191	0.247746	1.108678	0.188132	0.283771	0.143964	

	Distancia Lateral Horizontal (Eje Y)					Distancia Lateral Vertical (Eje Z)		
	-10	-5	0	5	10	0	5	10
Desv. Est.	0.096602	0.117861	0.123689	0.024382	0.329026	0.057964	0.132593	0.118591
Media	-9.14442	-5.39855	-0.8644	4.745122	9.925943	0.286246	4.195612	9.853701
Error Abs.	0.855584	0.398554	0.8644	0.254878	0.074057	0.286246	0.804388	0.146299

Eje X	Error %
Dist 1	4.2 %
Dist 2	0.93 %
Dist 3	0.44 %
Eje Y	Error %
Dist 1	8.54 %
Dist 2	0.08 %
Dist 3	0.67 %
Eje Z	Error %
Dist 1	4.2 %
Dist 2	16.06 %
Dist 3	1.48 %



# Prueba del Sistema

Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

**Pruebas y  
Resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Identificación de puntos  
característicos o “keypoints” en:

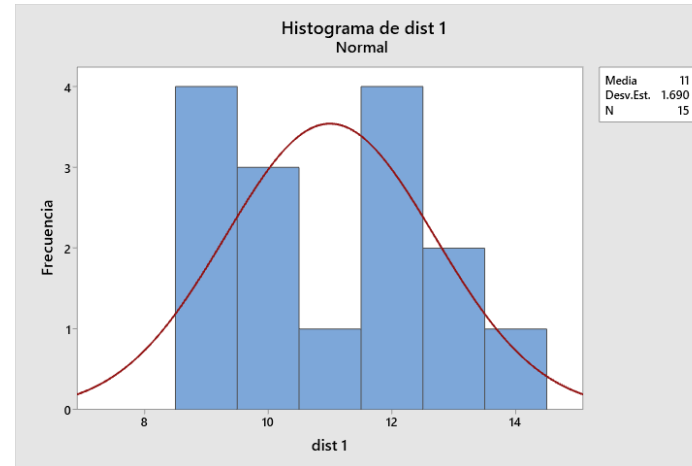
Dist 1: 25 cm

Dist 2: 40 cm

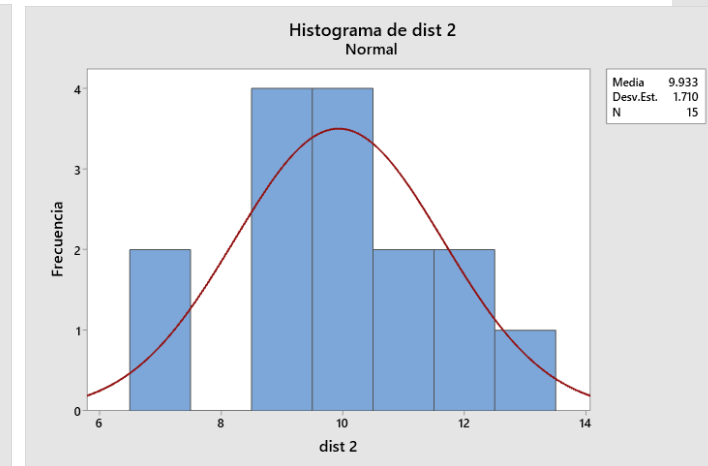
Dist 3: 50 cm

Prueba N	Keypoints		
	Dist 1	Dist 2	Dist 3
1	12	12	6
2	10	9	6
3	11	13	6
4	12	7	8
5	12	10	8
6	14	10	7
7	13	9	6
8	9	11	6
9	12	9	6
10	9	11	6
11	9	9	6
12	10	7	6
13	13	10	6
14	9	10	7
15	10	12	6
<b>Media</b>	<b>11</b>	<b>9.933</b>	<b>6.4</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>1.69</b>	<b>1.71</b>	<b>0.7368</b>

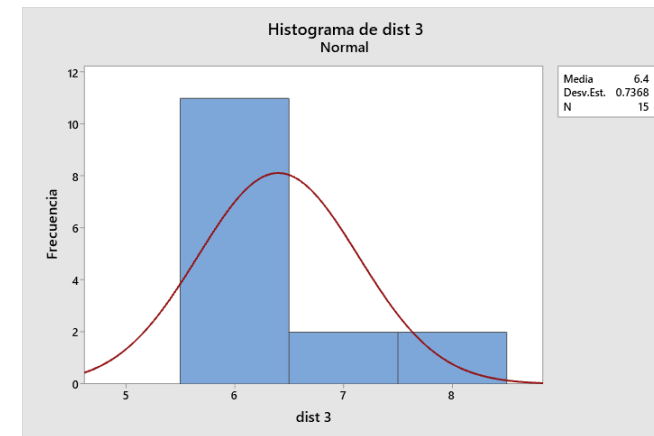
Dist 1



Dist 2



Dist 3







Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

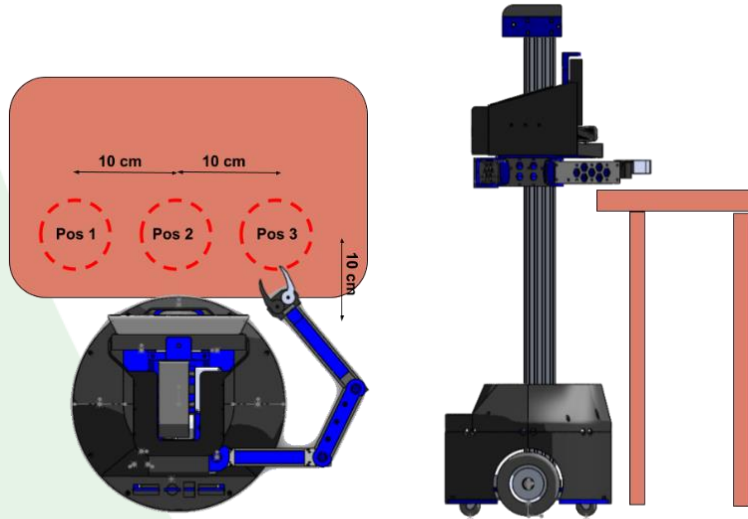
**Pruebas y  
Resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

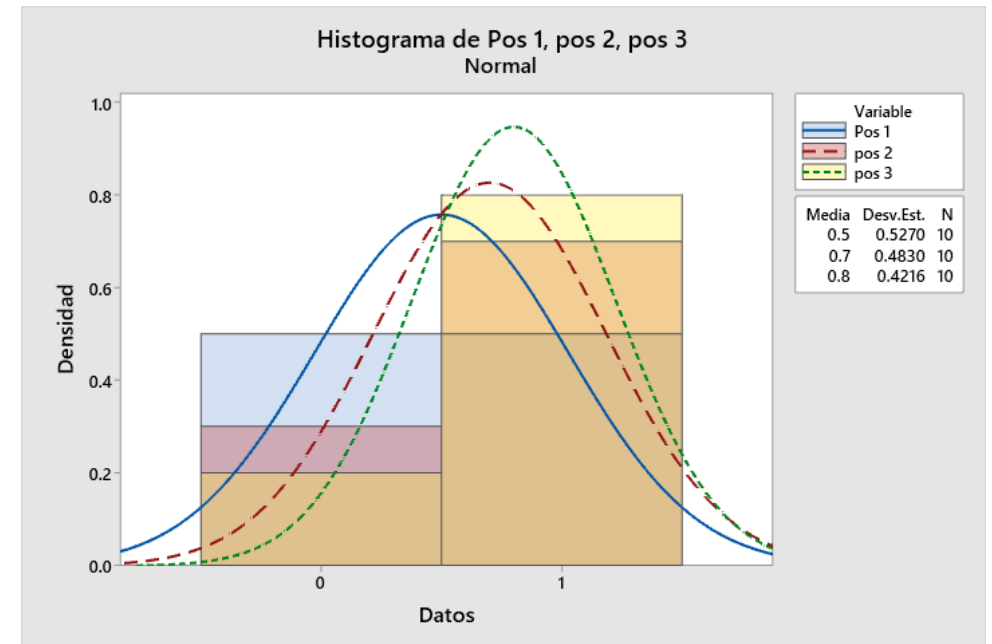
# Prueba del Sistema



## Resultados de asertividad en la aplicación Pick and Place

PRUEBA	PICK (Agarre de objeto)			PLACE (Desplazamiento del objeto)		
	pos 1	pos 2	pos 3	pos 1	pos 2	pos 3
1	1	1	1	0	1	1
2	0	1	1	0	1	1
3	0	1	1	0	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	0	1	1	0	1
6	0	1	0	0	1	1
7	0	0	1	1	1	1
8	1	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1	1
10	1	1	1	0	1	1

	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Media	0.5	0.7	0.8
Desv. Est.	0.527	0.483	0.4216



# Video Funcionamiento



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Conclusiones

- El sistema robótico detecta cierto objeto mediante una estimación de distancia con un sensor visual y lo toma para posicionarlo en otro lugar. La configuración de sus grados de libertad permite un alcance máximo del brazo manipulador de 50cm y su desplazamiento vertical es de 40cm a 100cm con respecto al piso.
- Torques y fuerzas máximas de 1.6 que son  $F_1 = 42.01 \text{ Nm}$ ,  $T_2 = 1.34 \text{ Nm}$ ,  $T_3 = 0.954 \text{ Nm}$  y  $T_4 = 0.728 \text{ Nm}$  que permitieron identificar los motores que necesita. La cinemática inversa permitió realizar un algoritmo que ayude a la identificación de los ángulos necesarios para llegar a la posición requerida donde se encuentre el objeto.
- La rigidez estructural aumentó. El equilibrio del robot es adecuado debido a la configuración inicial de posición de los eslabones y articulaciones en la base móvil superior.





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Conclusiones

- El diseño electrónico ha permitido la selección de los motores/servos acordes a los torques identificados que darán lugar al movimiento de las articulaciones del robot manipulador, además se seleccionó la tarjeta Jetson Nano como el controlador más adecuado conforme a sus especificaciones y que sea capaz de trabajar con los drivers de control para sus motores como el BusLinker y el Digital Stepper Driver.
- Carcasa del robot diferencial es impresa en 3D al igual que todo el brazo manipulador. Buena calidad de impresión y tolerancias consideradas en el diseño por lo cual no hubo necesidad de post procesado más que la eliminación de soportes de impresión.
- En el diseño de reconocimiento del objeto se logró una buena detección del objeto con un mínimo de 5 keypoints de coincidencia ya que normalmente se consigue de 13 a 21 keypoints del objeto a distancias razonables de 25cm con respecto al sensor "cámara" con un rango escalable de 0.8 del modelo configurado. Además, el sistema Pick and Place fue realizado por medio de nodos y tópicos generados en ROS con la paquetería de MoveIt que permite un control adecuado con robots manipuladores.
- El diseño de una interfaz gráfica ha sido desarrollado en Python con la ayuda de la librería KivyMD que es una interfaz visual gráfica muy adaptable a distintos sistemas operativos como versiones. Esta librería tiene funciones específicas para un desarrollo sencillo de diseño y este fue conectado por scripts publicadores en ROS para su control.



Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

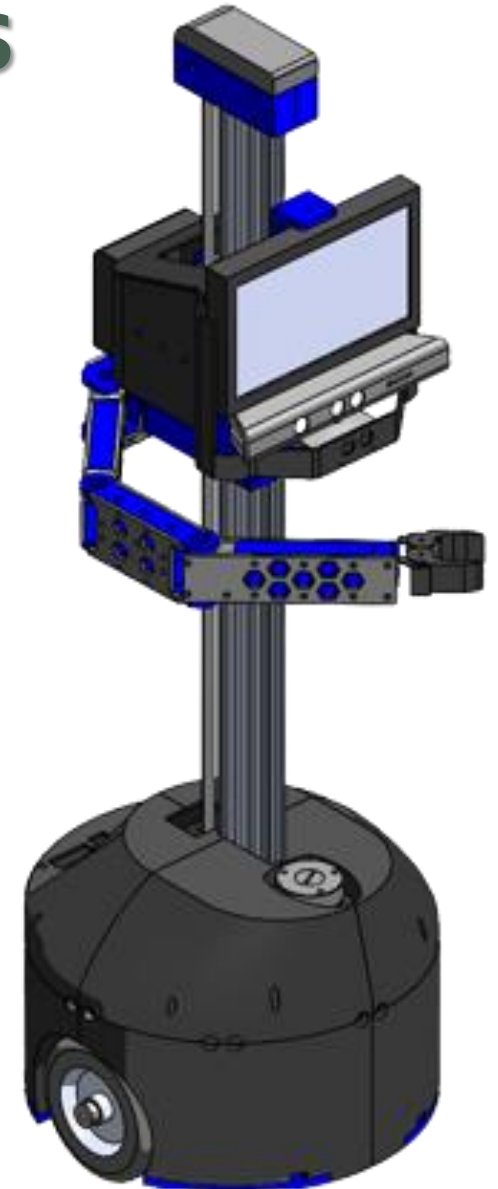
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Recomendaciones

- Se recomienda en el desarrollo el modelo dinámico realizarlo por el método matricial con el uso de formulaciones recursivas basadas en dinámica de Newton-Euler que reduce el número de adiciones y multiplicaciones matriciales que varían por el número de articulaciones en comparación con formulaciones de dinámica anteriores con dependencia  $n^4$ , que es el aproximadamente el 80% menos de operaciones que con el método dinámico Uicker.
- Se recomienda realizar un rediseño con un mayor ajuste en las articulaciones rotacionales de los eslabones del brazo para que el diseño mecánico del manipulador obtenga un menor ángulo de inclinación cuando se extienda completamente, ya que actualmente posee 2 grados de inclinación en la posición más crítica cuando llega a su alcance límite.





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

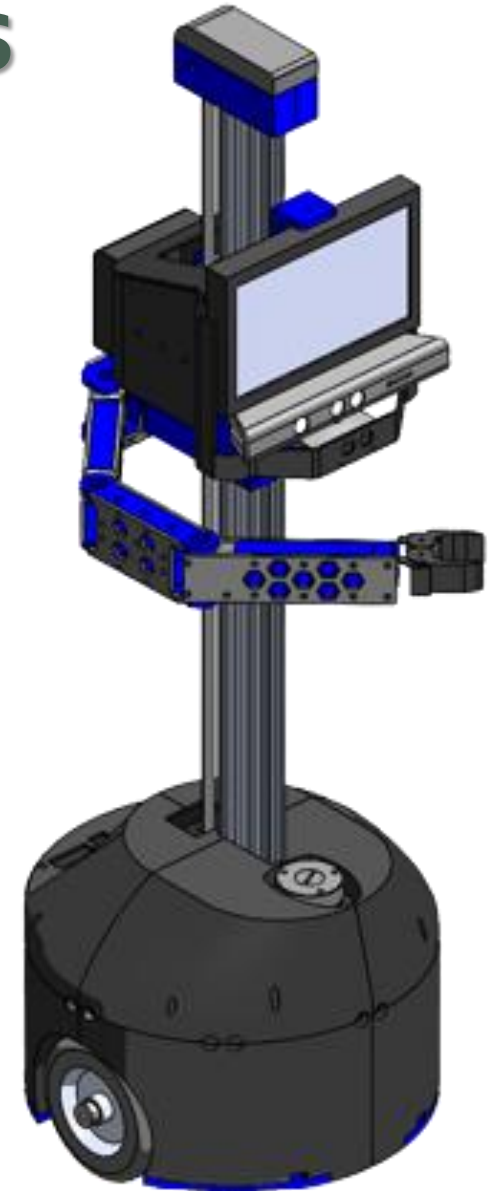
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Recomendaciones

- Se recomienda cargar la batería Tcbworth y procurar que no baje de los 9V debido a que esta batería pasa por un regulador boost que aumenta la tensión a 24V necesarios para la alimentación al Digital stepper driver que permite el movimiento al motor Nema23, caso el voltaje baje demasiado el convertidor no conseguirá aumentar la tensión necesaria.





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Recomendaciones

- La cubierta tipo domo se imprimió en 5 piezas debido al área limitante de la impresora utilizada. Se recomienda reducir el número de piezas e imprimir una nueva carcasa para la base diferencial del robot en otra máquina con mayor área de impresión para otorgar una mejor apariencia al robot en su parte inferior.
- Para lograr una estimación de distancia de objetos más precisa, se recomienda un entrenamiento de un modelo con la utilización de algoritmos más robustos como SURF que posee un mejor rendimiento o incluso la utilización de ORB un método open source que cualquiera puede acceder sin restricciones, ya que SIFT o SURF requieren de paquetes adicionales.
- Para la utilización de la Interfaz gráfica se recomienda inicializar todos los nodos en ROS dado que la interfaz solo publica tópicos a los nodos, caso no se encuentre inicializado los nodos de control el robot no ejecutará ningún movimiento al usar la HMI.





Introducción

Investigación  
previa

Metodología

Diseño y  
construcción

Pruebas y  
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

# Trabajos Futuros

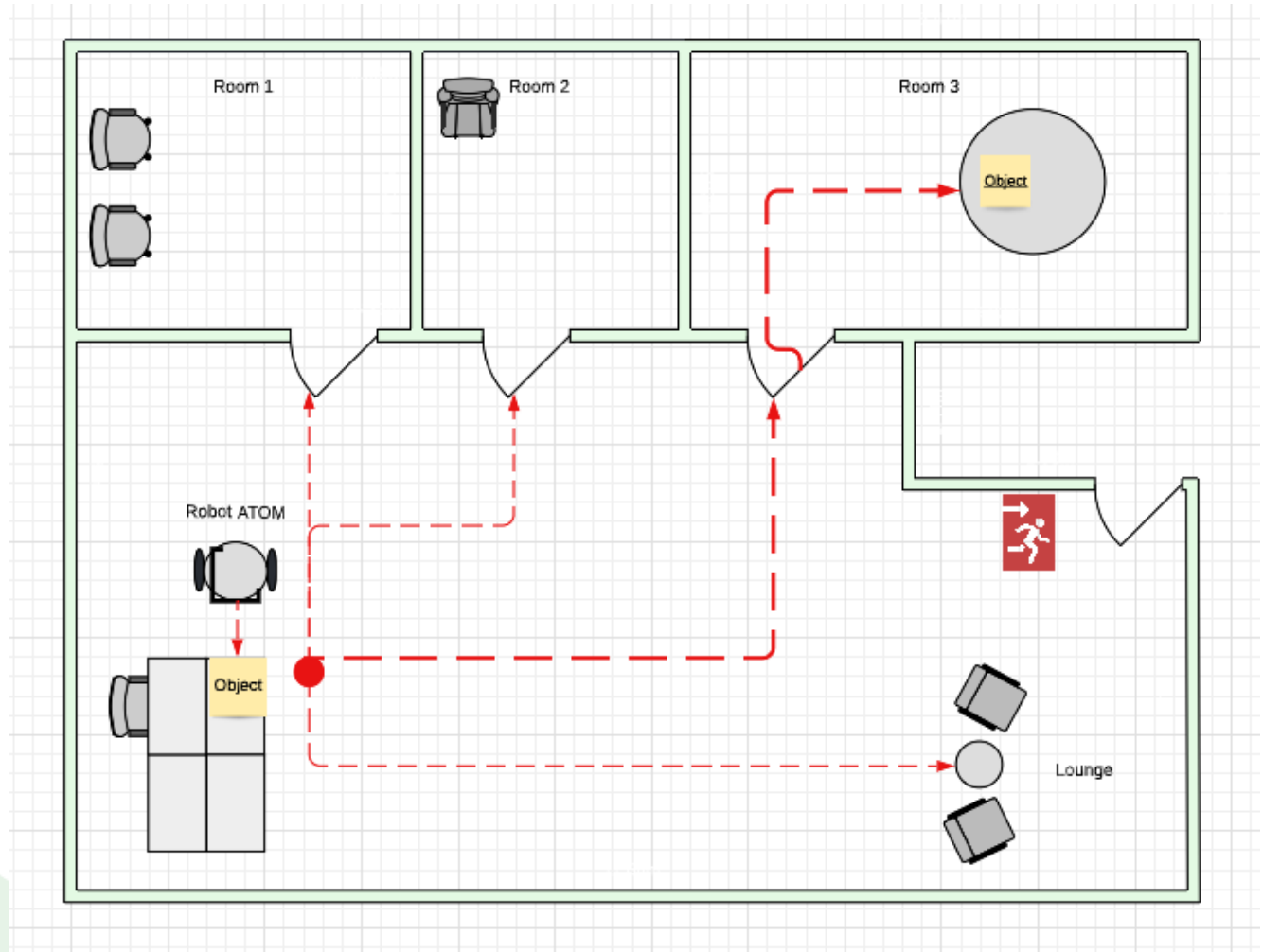
Entorno inteligente.

Más sensores de visión

Identificación de objetos alrededor  
de un entorno cerrado

Etiquetas de distintas áreas a  
distintos lugares para que facilite la  
localización y navegación del robot de  
telepresencia

Tomar un objeto y llevarlo a otra  
área diferente y así ampliar su aplicación  
tanto en manipulación como navegación





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN