

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 PROTOTIPO DE ROBOT COLABORATIVO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD CON GRABADO DE POSICIONES PARA TRABAJO SECUENCIAL APLICADO A TRANSPORTE DE PIEZAS MECÁNICAS”

AUTOR: ACHIG REINOSO JORGE ALEXANDER

DIRECTOR: ING. LOZA MATOVELLE DAVID CÉSAR MSc

2023





CONTENIDO

- Introducción
- Investigación previa
- Metodología
- Diseño y construcción
- Pruebas de rendimiento
- Conclusiones y recomendaciones
- Trabajos futuros



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Introducción

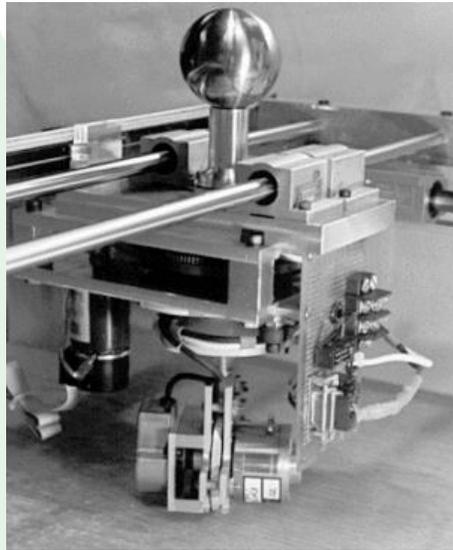
Antecedentes

Los cobots son un tipo de robots orientados al trabajo colaborativo cuyo origen surge de la necesidad de interacción hombre máquina en procesos de automatización flexible.

Universidad Northwestern, 1996

Incursión de la robótica en el sector de la automoción

Prototipo de cobot unicycle

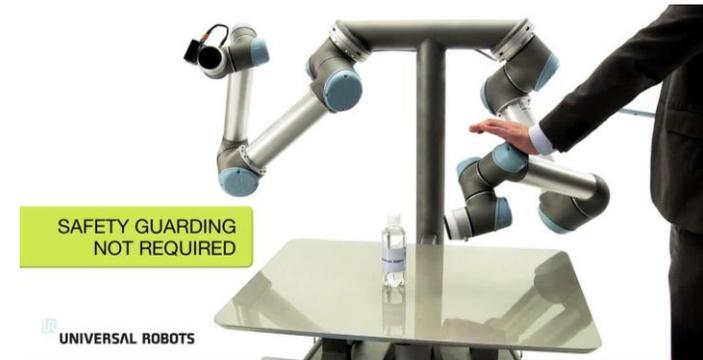


Nota. Tomado de (J. Edward Colgate, 1996)

Universal Robots, 2008

Robots en celdas de producción

Universal robots UR5



Nota. Tomado de (Universal robots, 2022)



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Introducción

Antecedentes

Los cobots son un tipo de robots orientados al trabajo colaborativo cuyo origen surge de la necesidad de interacción hombre máquina en procesos de automatización flexible.

FANUC, 2008

Robot colaborativo CR-35iA – 35 Kg

FANUC CR-35iA



Nota. Tomado de (FANUC, s.f))

Empresa ABB, 2015

Primer cobot con 2 brazos – 500 g

Yumi Robot



Nota. Tomado de (ABB, s.f)



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Objetivos

General

- Diseñar y construir un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas.

Específicos

- Dimensionar y seleccionar motores eléctricos del cobot para cada articulación.
- Diseñar e implementar un control en cada articulación para regular el giro ejercido por cada uno y permitir el desplazamiento de los actuadores para el proceso de grabado de posición.
- Establecer comunicación entre el cobot y el sistema operativo ROS para el envío y recepción de datos bidireccionales.
- Desarrollar e implementar una interfaz multiplataforma de visualización en tiempo real con conexión a ROS.



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Justificación e importancia

En Ecuador el tema referente a cobots se menciona de manera expectante, pero carente de propuestas, debido a la poca información, por lo cual se cataloga en una fase inicial.

La importancia de incursionar en este campo es sentar las bases de estructura, programación y funcionamiento. Siendo una guía para el desarrollo de trabajos futuros orientados a la automatización.

La solución planteada es remplazar los algoritmos que se generan a partir de cálculos, por un grabado sencillo de posiciones en base a ángulos de giro en cada uno de los grados de libertad.

Por medio de una interfaz de usuario, se permitirá la fácil visualización, envío de secuencia de trabajo y control del cobot, facilitando de este modo su uso por parte de usuarios cuyo conocimiento en robótica es bajo o medio.



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

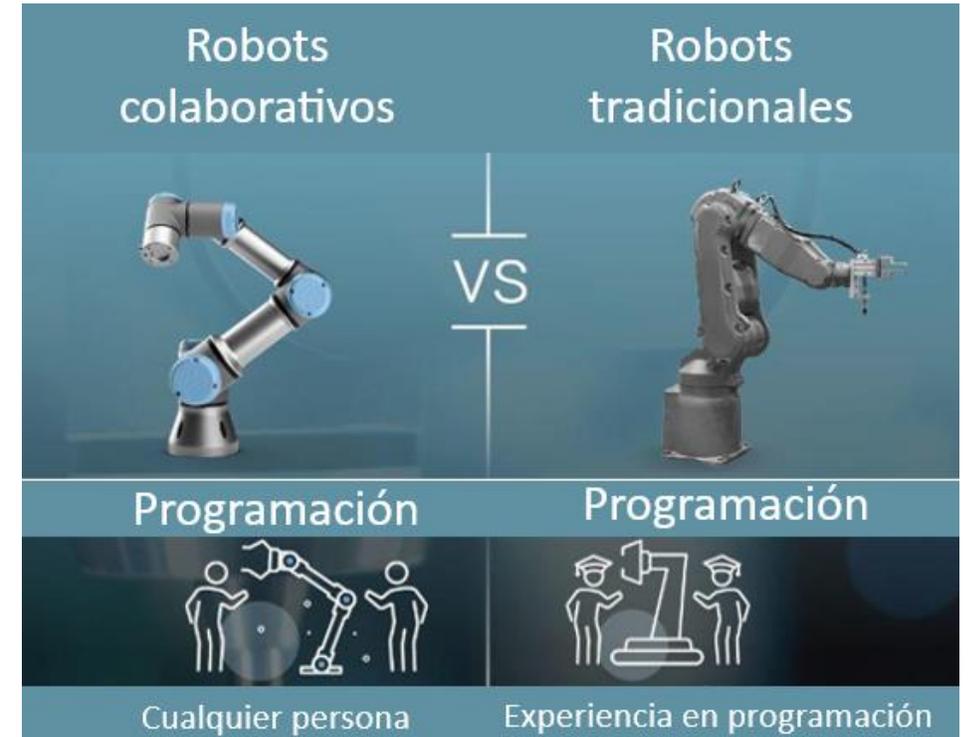
recomendaciones

Trabajos futuros

Características de los cobots

- Adaptabilidad.
- Tiempos cortos de ejecución.
- Menor carga laboral.
- Facilidad de uso
- Mayor control en comparación con robots convencionales

Ventajas de cobots frente a robots convencionales



Nota. Tomado de (Universal Robots, 2017)



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

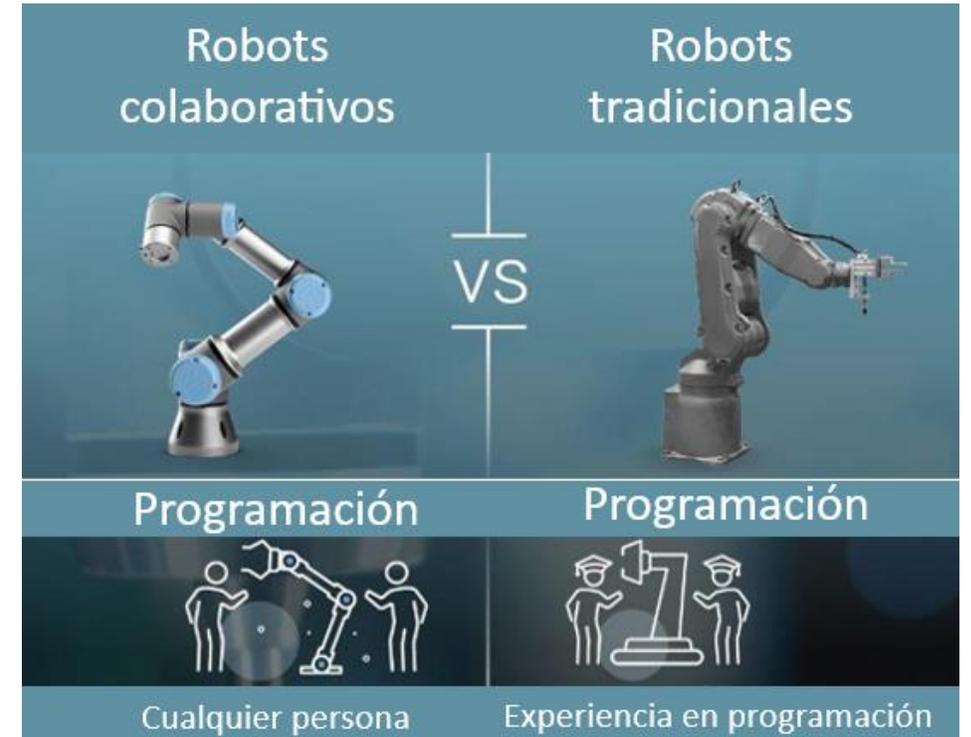
recomendaciones

Trabajos futuros

Ventajas de los cobots

- Programación de movimientos son conocimiento previo.
- Noción de posición en tiempo real.
- Reducción de choques al programar posiciones indebidas.
- Flexibilidad en operaciones y movimientos.
- Mejor planeamiento de trayectorias.
- Tiempo de programación reducido

Ventajas de cobots frente a robots convencionales



Nota. Tomado de (Universal Robots, 2017)



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

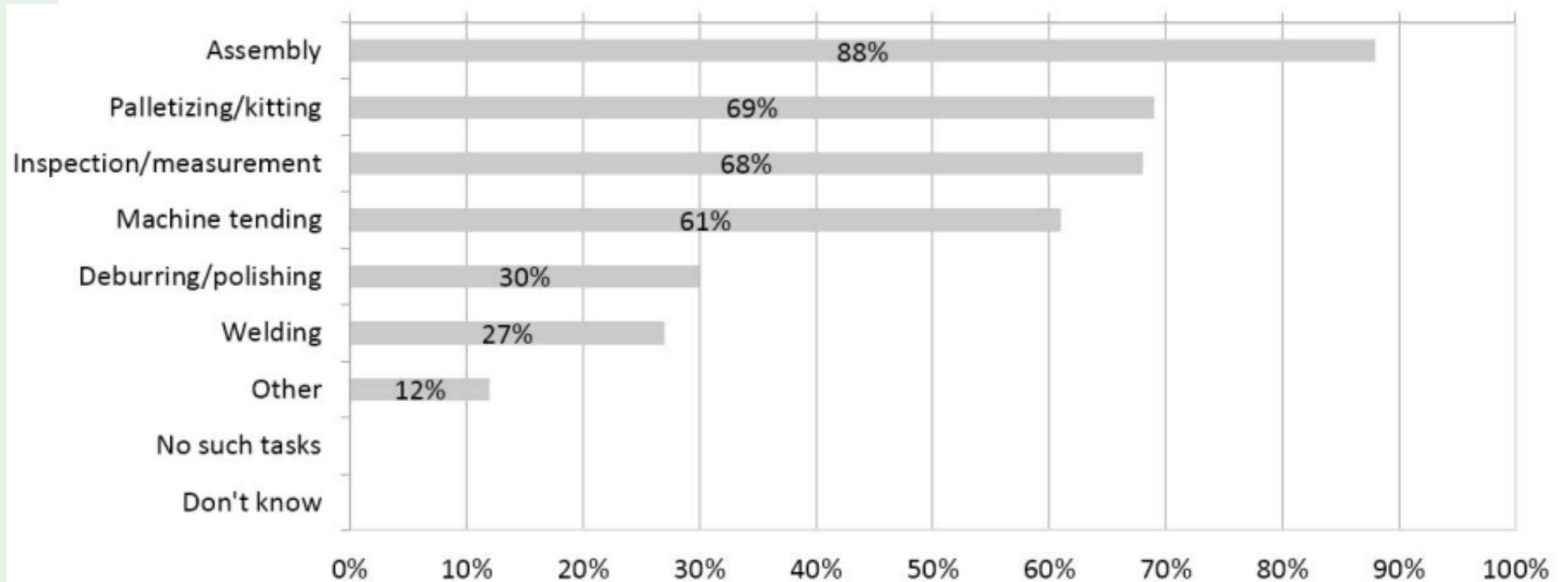
Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Potenciales aplicaciones para cobots

Según la edición número 29 de la Conferencia internacional de Manufactura inteligente y automatización flexible (FAIM, 2019)



Nota. Tomado de (FAIM, 2019)



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

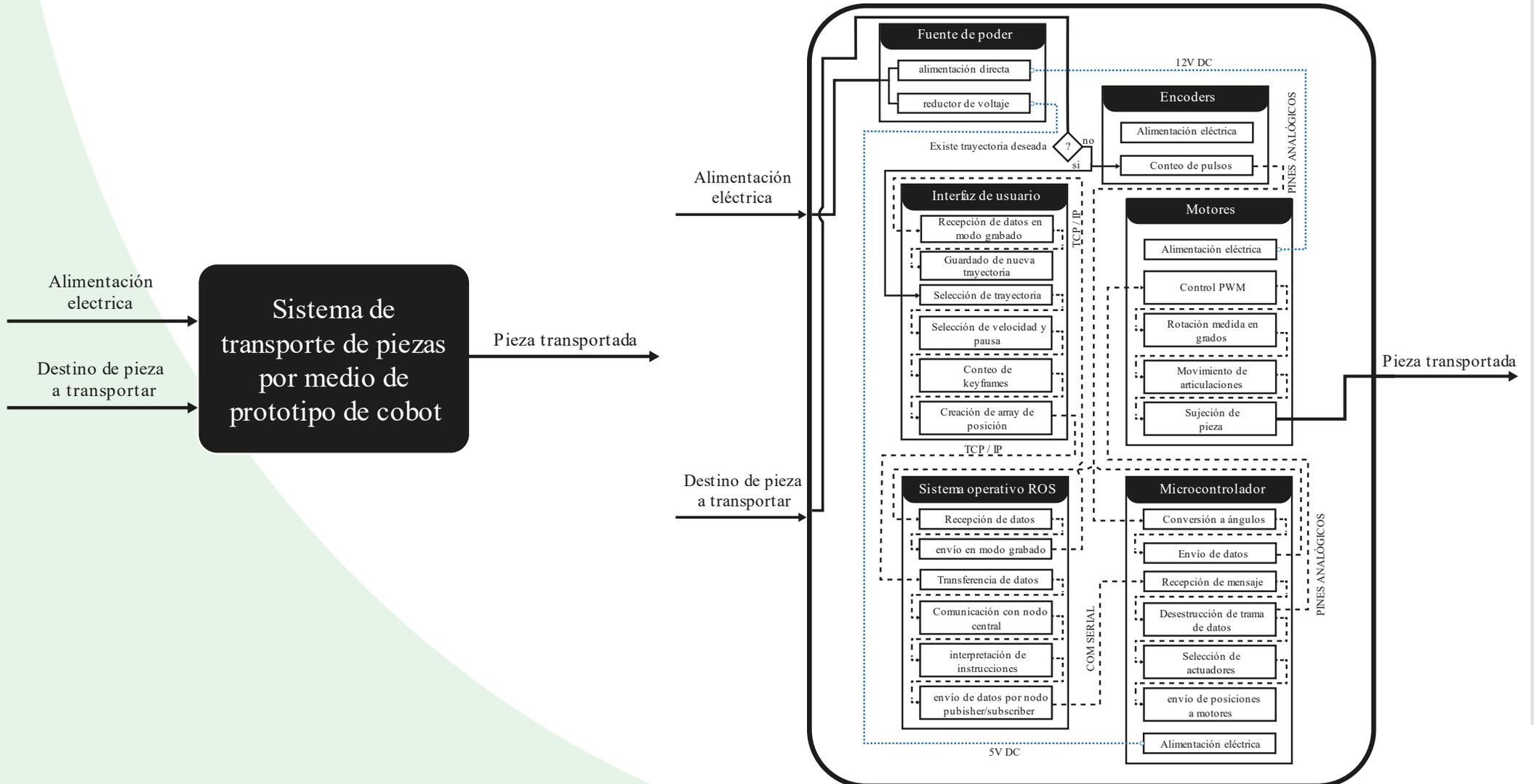
rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Planeación de arquitectura





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Desarrollo de concepto

Número	Concepto	Requerimiento	Importancia
1	Manufactura	Estructura estable	5
		Materiales resistentes a condiciones extremas	3
		Sistema fácil de transportar	3
		Equipo de fácil desarmado	3
		Material plástico	1
2	Desempeño	Altas velocidades de funcionamiento	3
		Capacidad alta de carga	2
		Tiempos prolongados de trabajo	2
		Precisión en posicionamiento de efector final	4
		Capacidad de adaptabilidad a diversos medios	5
3	Seguridad	Paros de emergencia	5
		Control de velocidad	4
4	Interfaz de Usuario	Fácil manejo	5
		Multiplataforma	2
		Información fácil de interpretar	5
		Estéticamente agradable	4
5	Costos	Bajo costo	5



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

		Cómo?	Manufactura					Desempeño			Seguridad			Interfaz de usuario			Costos	
		Qué?	Importancia	Plástico PLA	Acero Inoxidable	Construcción mixta	Motor a pasos	Servomotores Mg 996r	Servomotores RoHS	Control Manual	Control por interfaz	Control Mixto	HMI - PLC	Dashboard - Javascript	Tkinter - Python	Construcción mixta	Componentes importados	
1. REQUERIMIENTOS DE LOS CLIENTES																		
1		Estructura estable	5	7	9	9												
2		Materiales resistentes a condiciones extremas	3	3	9	8												
3		Sistema fácil de transportar	3	7	9	8												
4		Equipo de fácil desarmado	3	9	7	8												
5		Material plástico	1	9	0	7												
6		Altas velocidades de funcionamiento	3				6	9	9									
7		Capacidad alta de carga	2				7	5	9									
8		Tiempos prolongados de trabajo	2				9	9	9									
9		Precisión en posicionamiento de efector	4				9	7	9									
10		Capacidad de adaptabilidad a diversos medios	5				8	7	8									
11		Paros de emergencia	5							9	8	9						
12		Control de velocidad	4							6	9	9						
13		Fácil manejo	5									3	9	6				
14		Multiplataforma	2									0	9	7				
15		Información fácil de interpretar	5									5	9	8				
16		Estéticamente agradable	4													9	7	
17		Bajo costo	5													7	3	
EVALUACION DE IMPORTANCIA		ABSOLUTA	101	120	124	126	118	139	69	76	81	40	108	84	71	43		
		RELATIVA (%)	17	21	21	22	20	24	12	13	14	7	19	14	12	7		



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

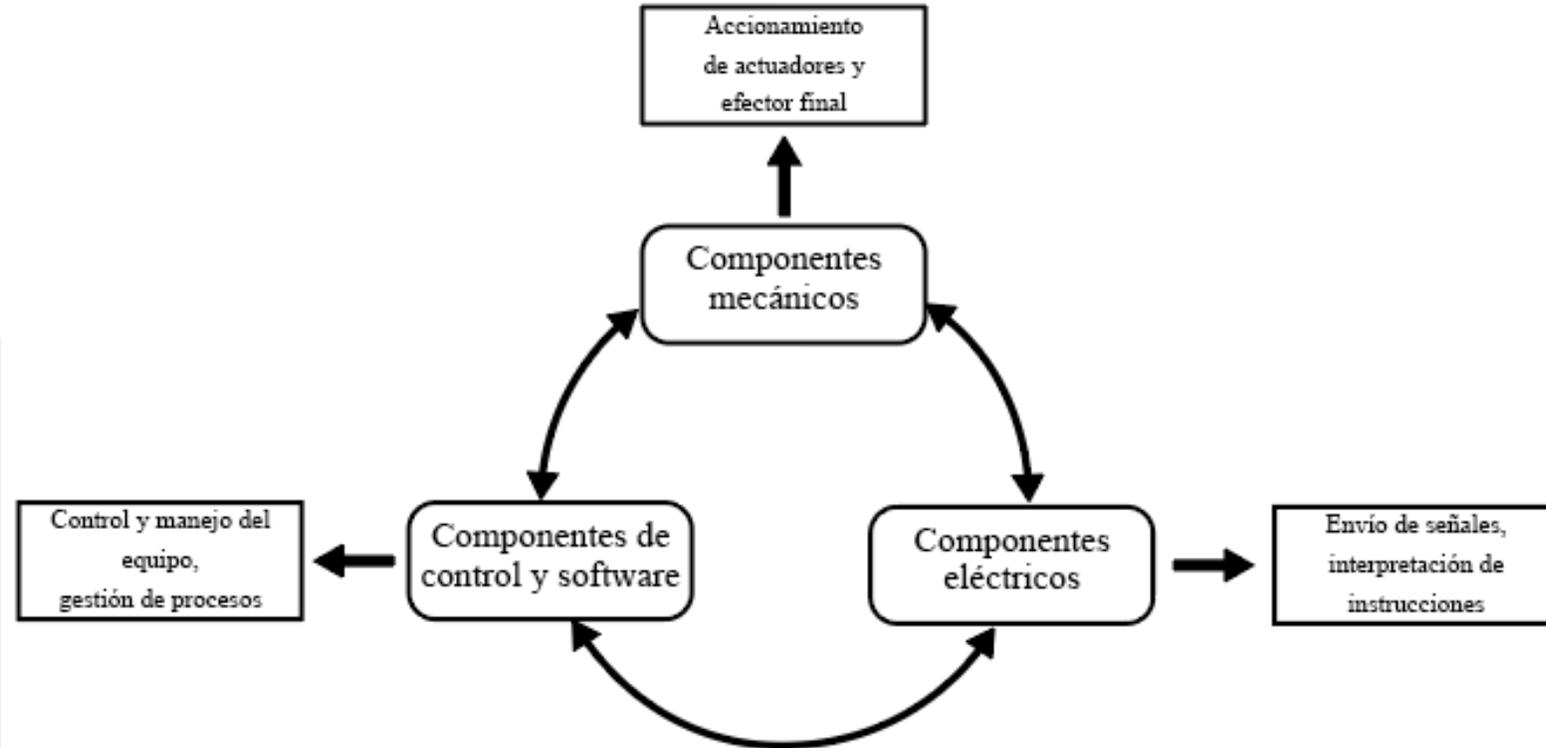
Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Generación de concepto

Esquema general del proyecto, componentes





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

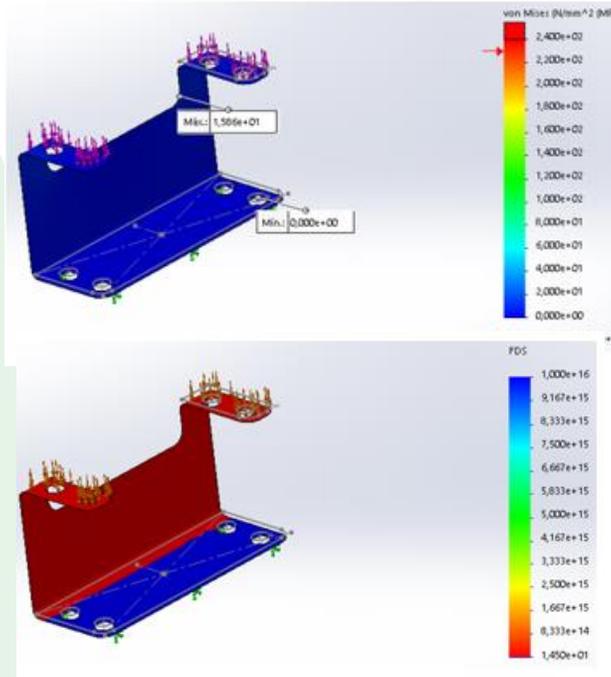
recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes mecánicos

Análisis de esfuerzos

Base



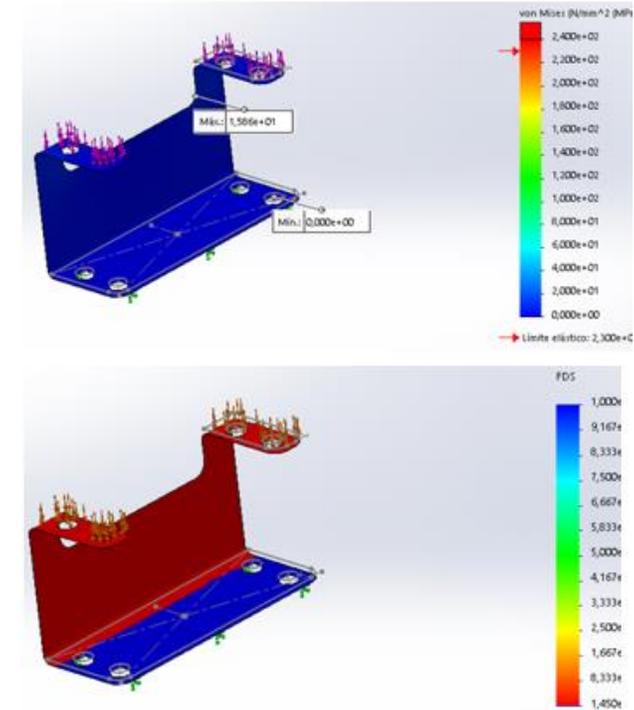
Fuerza 5.73 [N]

Esfuerzo máximo de 15,86 [MPa]

Límite elástico de 2.30 [MPa]

FS: 14,50

Soporte brazo



Fuerza 3.44 [N]

Esfuerzo máximo de 1,07 [MPa]

Límite elástico de 2.30 [MPa]

FS: 214,95



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

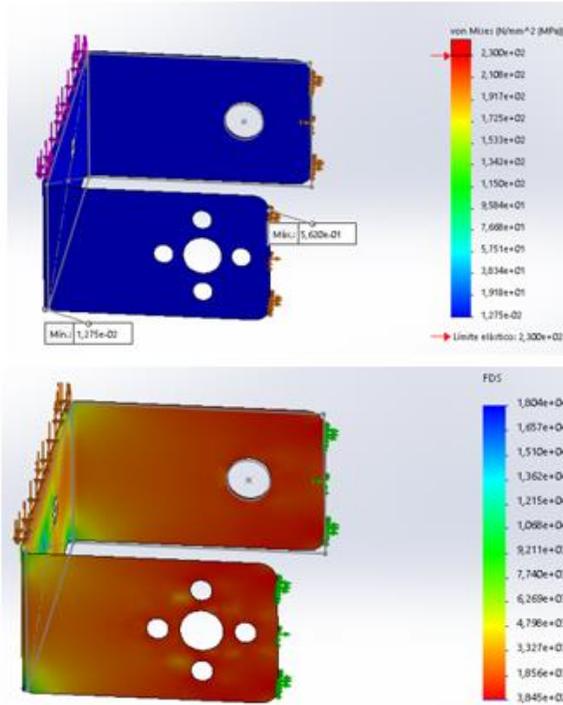
recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes mecánicos

Análisis de esfuerzos

Brazo



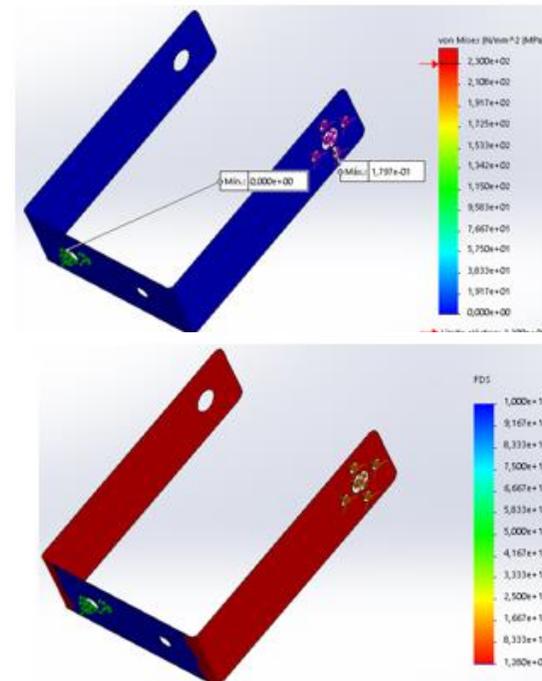
Fuerza 2.88 [N]

Esfuerzo máximo de 0,562 [MPa]

Límite elástico de 2.30 [MPa]

FS: 409,98

Extensión brazo



Fuerza 1.96 [N]

Esfuerzo máximo de 0,179 [MPa]

Límite elástico de 2.30 [MPa]

FS: 1279,91



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

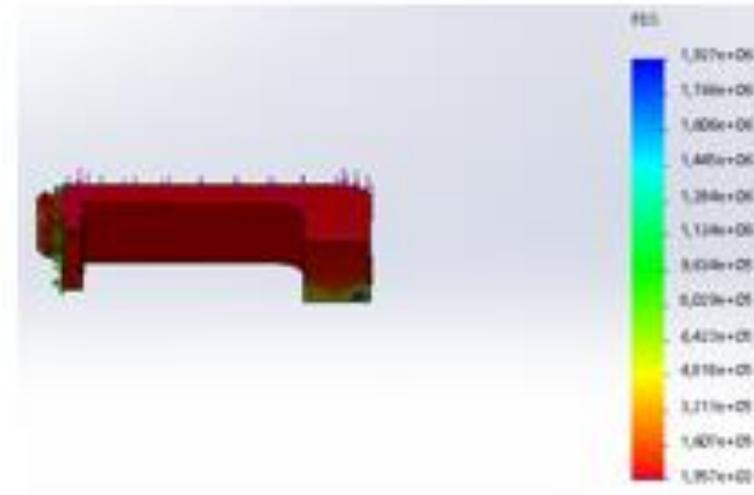
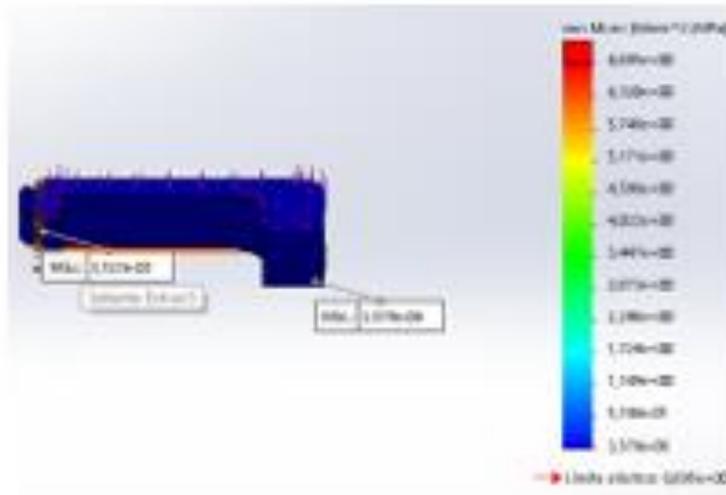
recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes mecánicos

Análisis de esfuerzos

Tenaza derecha



Fuerza 0.196 [N]

Esfuerzo máximo de 3,57e-6 [MPa]

Límite elástico de 6,89 [MPa]

FS: 192,99



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

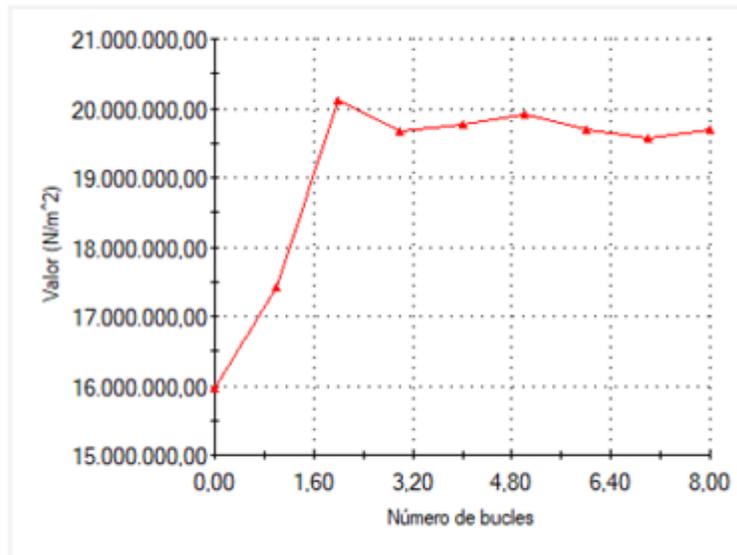
Trabajos futuros

Convergencia por método h

Solución adaptativa

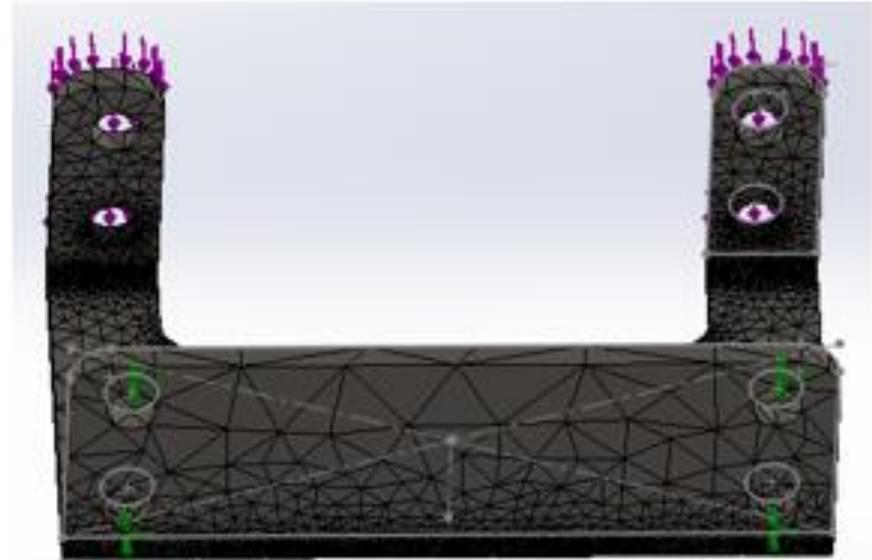
Convergencia método h. Grafica de convergencia y corrección de mallado

Gráfico de convergencia de método h



Criterio global: Error total de norma de energía de deformaciones unitarias relativa < 2.85807%

—●— Máxima tensión de von Mises





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

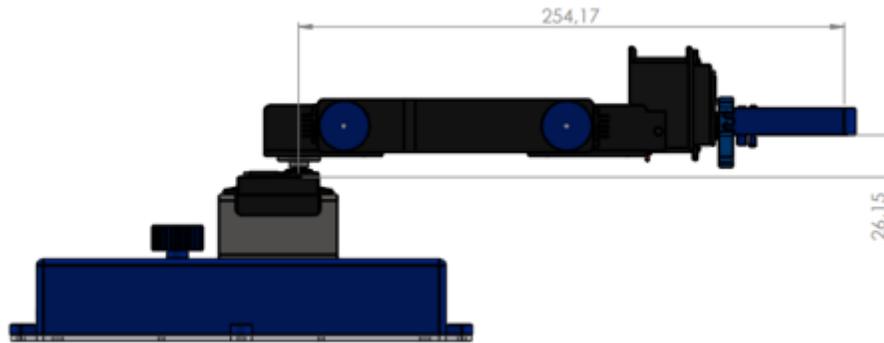
Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes eléctricos

Servomotores



torque requerido de 6.58 [kg/cm]

Datos técnicos servomotores

Parámetros	TOWER PRO SPT5435LV 35KG	TOWER PRO MG996 13KG 180
	180 GRADOS	GRADOS
Peso	71 [g]	55 [g]
Dimensiones	40.5 x 20 x 40.5 [mm]	40.7 x 19.7 x 42.9 [mm]
Torque	29 [Kgf/cm] a 4.8 [V] 35 [Kgf/cm] a 6 [V]	9.4 [Kgf/cm] a 4.8 [V] 13 [Kgf/cm] a 6 [V]
Voltaje	4.8 [V] – 6 [V]	4.8 [V] – 6 [V]
Consumo energía	1 A	500 [mA] – 900 [mA] (6A)
Rango Temperatura	-10 °C – 50 °C	0°C – 55 °C

Imagen Referencial





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes eléctricos

Microcontrolador

- 3 entradas analógicas .
- 2 Terminales para comunicación I²C.
- Memoria flash de al menos 1MB.
- Microprocesador de 32 Bits.
- 2 Núcleos

Datos técnicos microcontrolador

Parámetros	ESP32 <u>Node</u> MCU	Arduino UNO R3
Tensión de funcionamiento	3.3 [V]	5 [V]
Consumo de corriente	20 mA – 240 mA	45 mA – 80 mA
Pines de E/S digitales PWM	36	6
Pines analógicos	15	6
SPI/I ² C/I ² S/UART	4/2/2/2	1/1/1/1
Rango Temperatura	-10 °C – 50 °C	0°C – 55 °C
Memoria <u>flash</u>	4MB	32 KB
Costo referencial	11 USD	22 USD
Procesadores	dual	simple



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

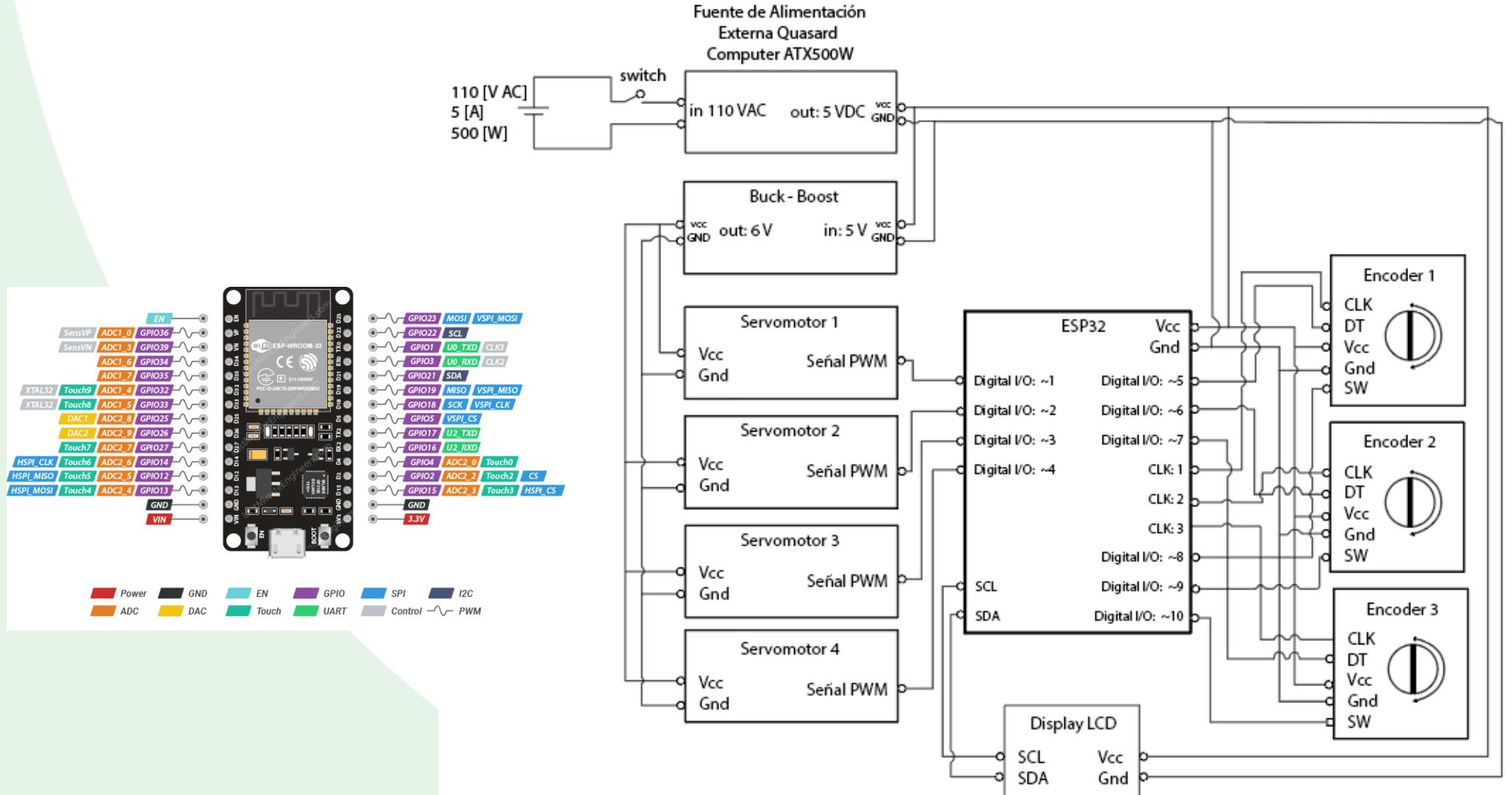
rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Circuito eléctrico





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Consumo energético

Consumo energético de cobot

Elemento	Cantidad	Consumo Corriente	
		Unitario [mA]	Total [mA]
Servomotor SPT5435LV	3	1000	3000
Servomotor MG996	1	500	500
Encoders	3	25	25
Esp32	1	240	240
TOTAL			3765 [mA]

Parámetros	Quasard Computer ATX500W
Voltaje de entrada	110 [V AC]- 220 [V AC]
Voltaje de Salida	5 [V DC] – 12 [V DC]
Potencia	500 [W]
Amperaje máximo	5 [A]
Frecuencia	50 [Hz] – 60 [Hz]

Imagen Referencial





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

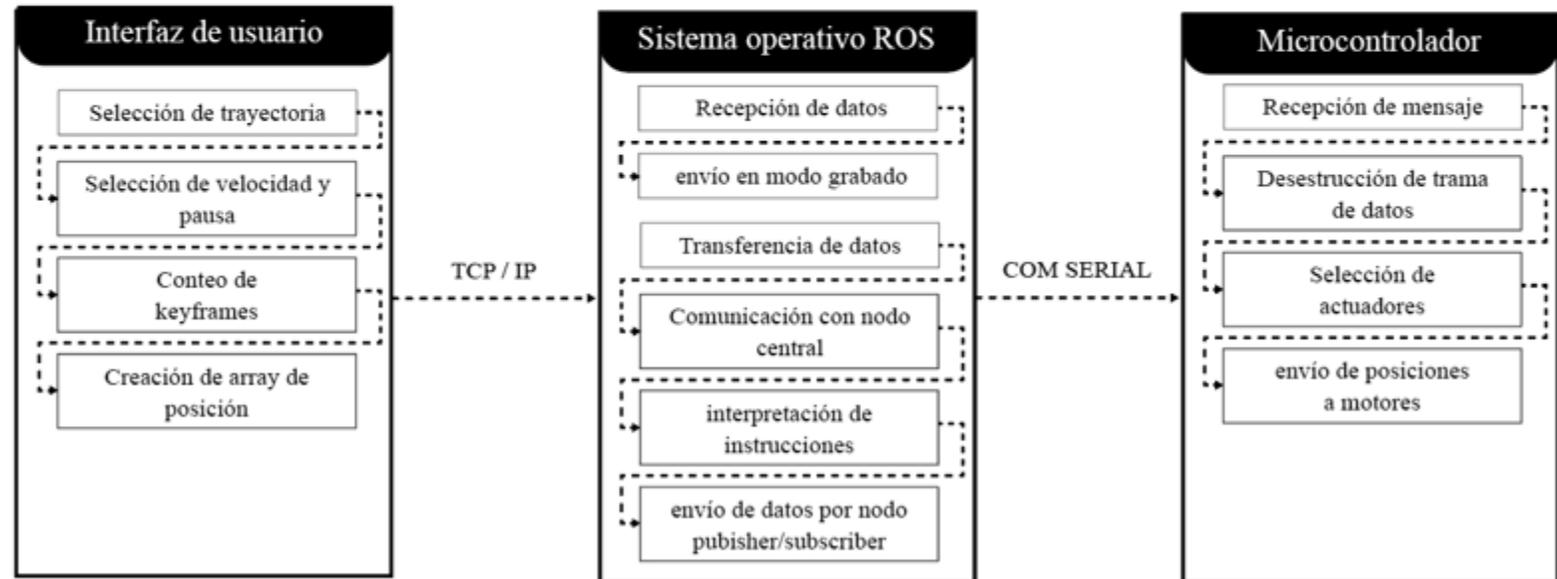
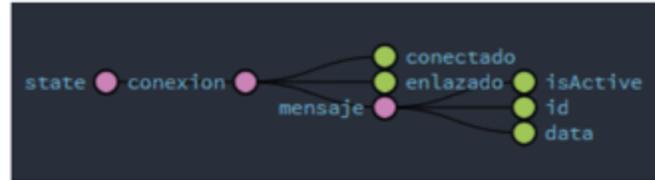
Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes de control y software

Diagrama de transmisión de datos





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

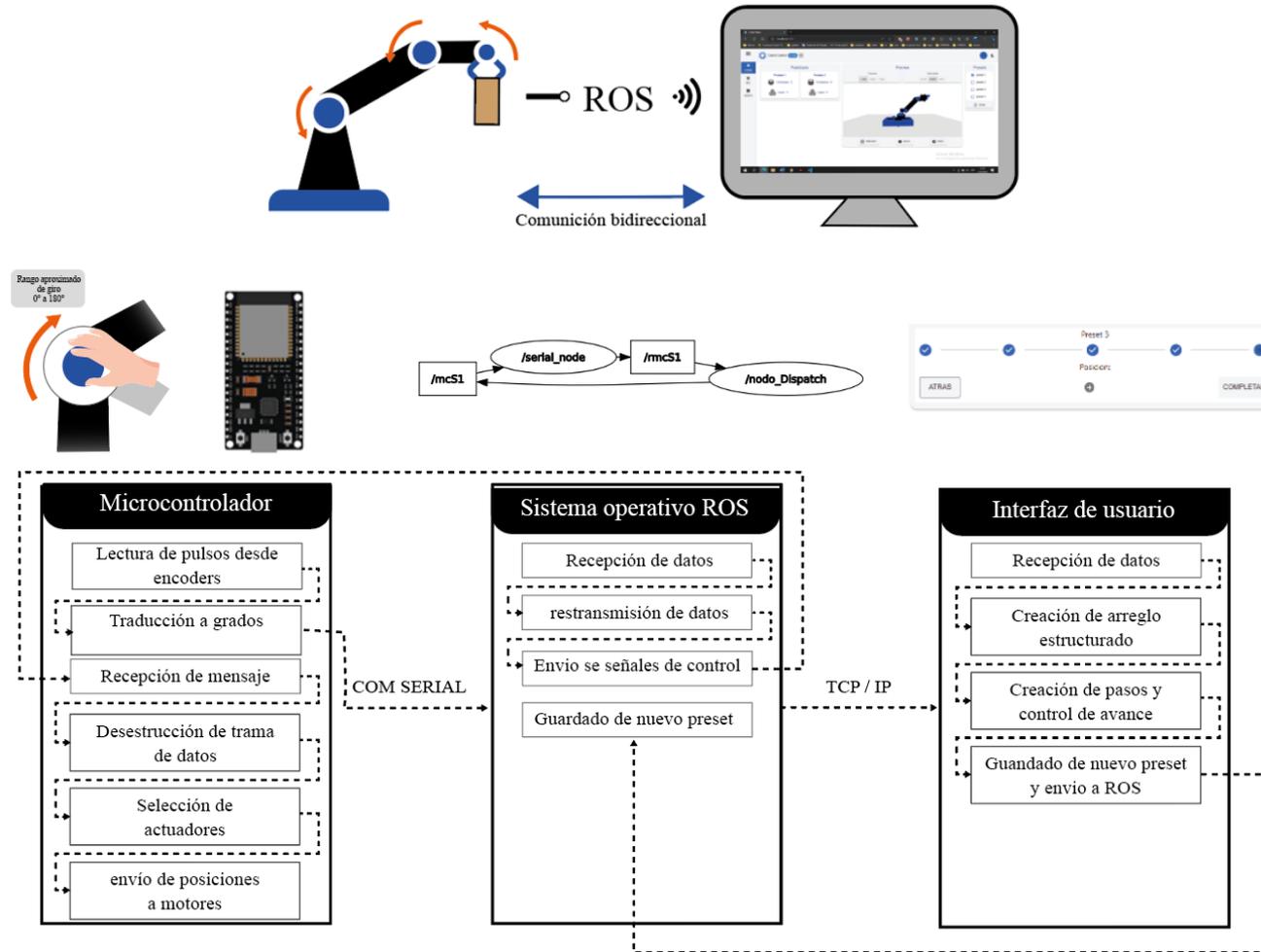
recomendaciones

Trabajos futuros

Componentes de control y software

Subsistema de grabado de posiciones. Capturar los ángulos de giro de cada encoder correspondientes a los motores

Diagrama de grabado de posiciones





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

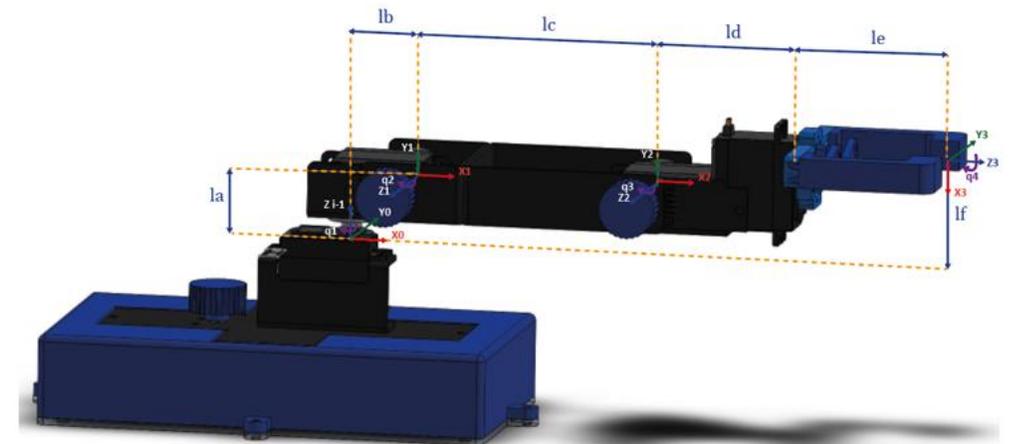
Trabajos futuros

Cinemática directa

Subsistema de grabado de posiciones. Capturar los ángulos de giro de cada encoder correspondientes a los motores

Modelado de cinemática directa

q	θ [°]	d [mm]	a [mm]	α [°]
H_1^0	q_1	l_a	0	+90
H_2^1	q_2	0	l_b+l_c	0
H_3^2	q_3-90	0	0	-90
H_4^3	0	0	l_d+l_e	0





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

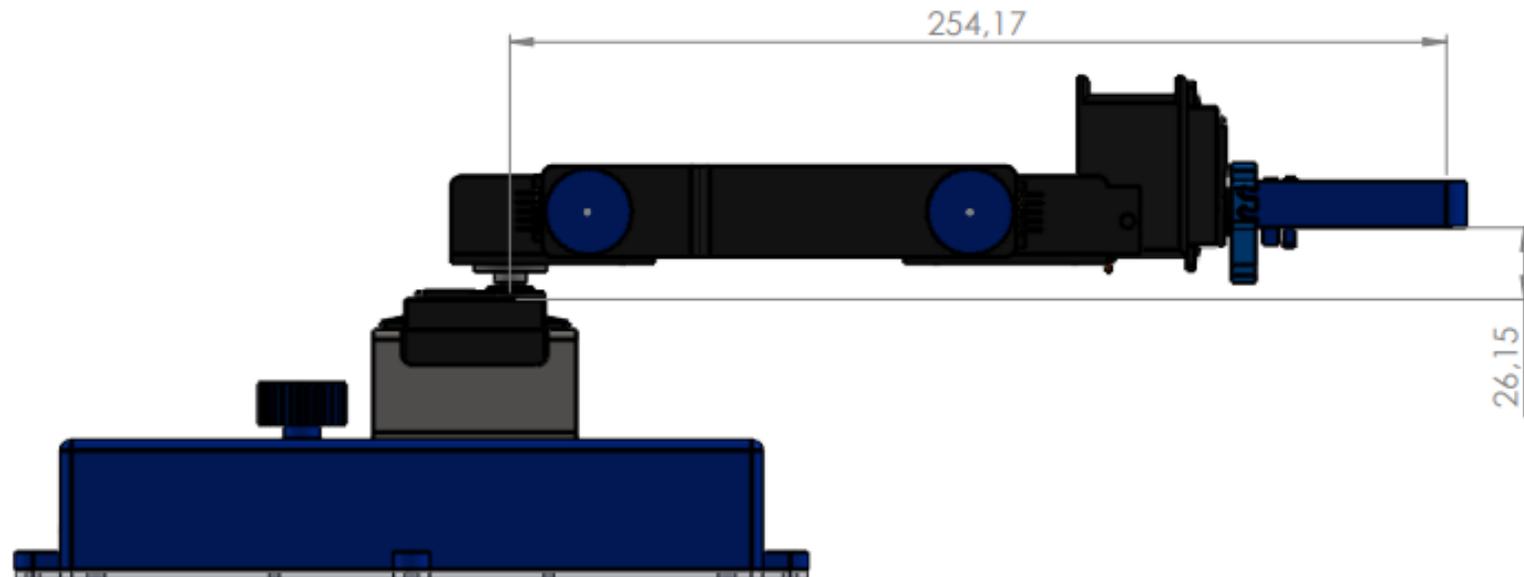
recomendaciones

Trabajos futuros

Cinemática directa

Subsistema de grabado de posiciones. Capturar los ángulos de giro de cada encoder correspondientes a los motores

$$H_1^0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & lb + lc + ld + le \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & l_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 254.17 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 26.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Dinámica del cobot

Se utiliza la ecuación de Euler-Lagrange

- Jacobiano.
- Velocidad lineal y angular.
- Energía cinética lineal.
- Energía potencial.
- Lagrangiano.

$$L = \sum_{i=1}^n [K\omega_n + KV_n - V_n]$$

Donde:

$K\omega_n$ = Energía cinética rotacional.

KV_n = Energía cinética lineal.

V_n = Energía potencial.

$$j\omega_n = [{}^0R_0\vec{z}, {}^0R_1\vec{z} \dots {}^0R_{n-1}\vec{z}]$$

$$jv_n = [{}^0R_0\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_0), {}^0R_1\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_1) \dots {}^0R_{n-1}\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_{n-1})]$$

Donde:

0R_N = Matriz de rotación de articulación n.

0P_N = Vector de posición de articulación n.



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

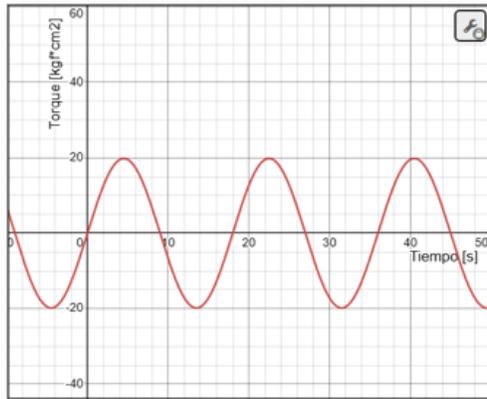
Dinámica del cobot

Cálculo de torques

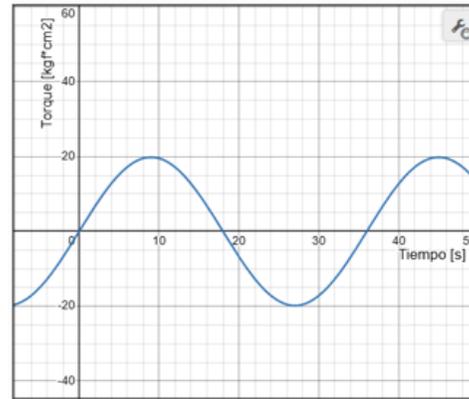
Por medio de la ecuación de Euler-Lagrange se obtiene los cálculos de energías hasta llegar la lagrangiano cuya expresión proporciona un mejor dimensionamiento del torque requerido para los servomotores

$$\tau_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

Grafica de torques. a) Segunda articulación, b) Tercera articulación



a)



b)

Donde:

τ_i = Torque requerido para mover cada articulación.

\dot{q}_1 = Velocidad constante de cada motor de 4° por segundo.

Matriz de inercia y valor de masa de eslabones

Número de eslabón	Masa [kg]	Matriz de inercias [kg m ²]
1	0.0426	$\begin{bmatrix} 6.64 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1.57 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 1.88 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$
2	0.0482	$\begin{bmatrix} 9.26 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1.85 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 2.28 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$
3	0.151	$\begin{bmatrix} 1.27 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1.76 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 2.86 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$
Carga	0.02	$\begin{bmatrix} 1.11 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 2.44 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 2.96 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Dinámica del cobot

Diagrama de ensamblaje de cobot

Base plástica asegurada
con placa de acero inoxidable



Servomotores atomillados
y alineados

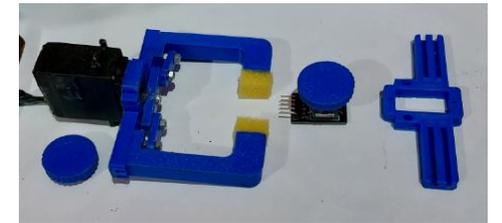
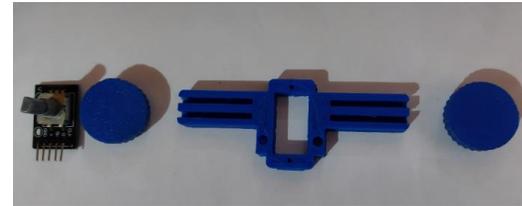
Encodes paralelos
al eje de giro de actuadores



Base modular para
intercambio de herramienta



Circuito eléctrico conectado
a sensores y actuadores





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Configuración del equipo

Inicio y configuración del S.O Linux

Jul 20 10:48

```
user@ubuntu: ~  
user@ubuntu: ~ 80x11  
Rocs is a Graph Theory IDE for designing and analyzing graph algorithms. It  
provides an easy to use visual editor for creating graphs, a scripting  
engine to execute algorithms, and several helper tools for simulations and  
experiments. Algorithms are specified in JavaScript.  
snap-id: YTmFHP6zp4uhENDG50p47B61WPPoo2P8  
channels:  
latest/stable: 23.04.1 2023-05-26 (92) 208MB -  
latest/candidate: 23.04.1 2023-05-26 (92) 208MB -  
latest/beta: ↑  
latest/edge: ↑  
user@ubuntu:~$  
user@ubuntu: ~ 80x11  
user@ubuntu:~$ python3 --version  
Python 3.8.10  
user@ubuntu:~$
```

- Volume control
- Wired Connected
- Settings
- Lock
- Power Off / Log Out



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Inicio de interfaz

Interfaz de usuario

Cobot Main

localhost:3000

Cobot Control V 1.0.0

Inicio

Grabar

Paletizado

Probeta 1
Unidades: 0
cajas: 0

Probeta 2
Unidades: 0
cajas: 0

Previsualizar

Pausas: 2 SEG, 4 SEG, 7 SEG

Velocidad: LENTO, NORMAL, RÁPIDO

PREVISUALIZAR INICIO PARO

Secuencias

secuencia 1
 secuencia 2

SYNC

TESTP



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

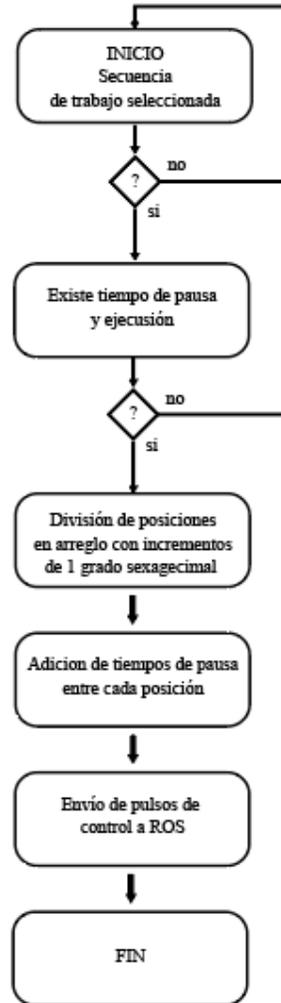
rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Selección de secuencias de trabajo



Selección de secuencias desde interfaz de usuario a) Mensaje ROS, b) Interfaz

```
user@ubuntu: ~ 39x11
user@ubuntu:~$ rosrund robot1 wsnode.py
connected
Se solicitó presets
```

a)



b)



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Previsualización

Previsualizar

Pausas

2 SEG

4 SEG

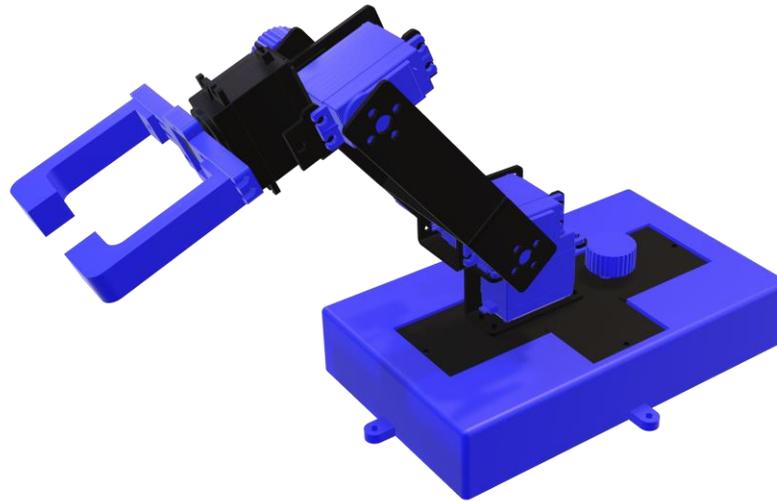
7 SEG

Velocidad

LENTO

NORMAL

RÁPIDO



PREVISUALIZAR



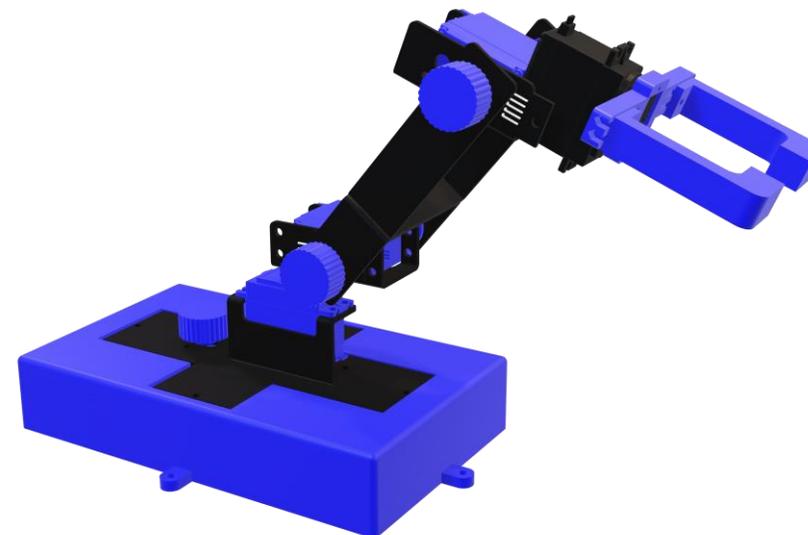
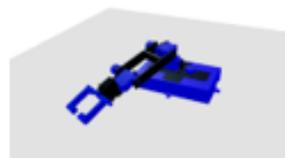
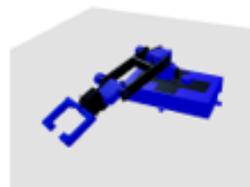
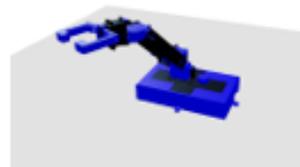
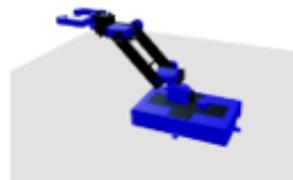
INICIO



PARO

Estructura de formas clave para secuencias de trabajo

```
[  
  {  
    dof1: 90,  
    dof2: 135,  
    dof3: 135,  
    dof4: 15,  
  },  
  {  
    dof1: 23,  
    dof2: 135,  
    dof3: 135,  
    dof4: 15,  
  },  
  {  
    dof1: 23,  
    dof2: 75,  
    dof3: 100,  
    dof4: 15,  
  },  
  {  
    dof1: 23,  
    dof2: 75,  
    dof3: 100,  
    dof4: 70,  
  }  
]
```



- ECUADOR
- Introducción
- Investigación previa
- Metodología
- Diseño y construcción
- Pruebas de rendimiento
- Conclusiones y recomendaciones
- Trabajos futuros



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Estructura de formas clave para secuencias de trabajo

Cobot Control V 1.0.0

Inicio

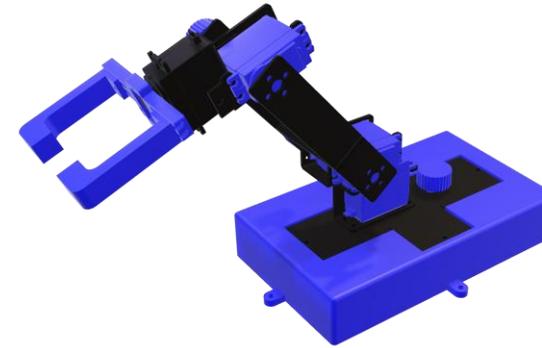
Grabar

1

Grados de Libertad

Componente	min	max	Valor Actual
Base	0 °	180 °	90
Brazo	0 °	180 °	135
Antebrazo	0 °	180 °	
Pinza	Open	Presión 70	

Previsualizar



A

Secuencias

GUARDAR

NUEVO

2

NUEVO PRESET

Nombre

Secuencia 3

ACEPTAR



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

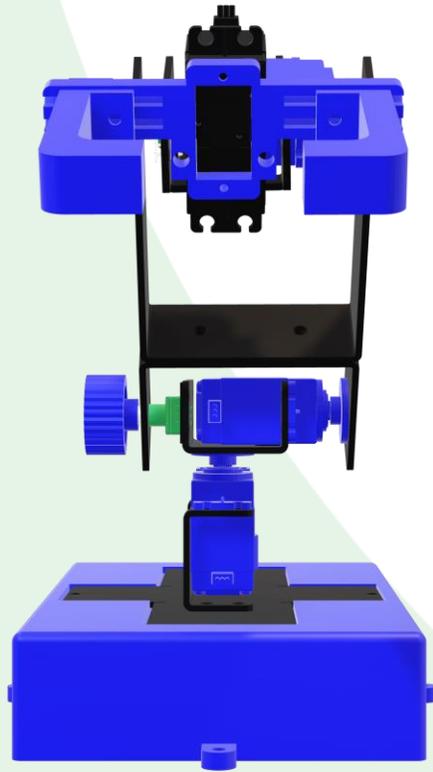
rendimiento

Conclusiones y

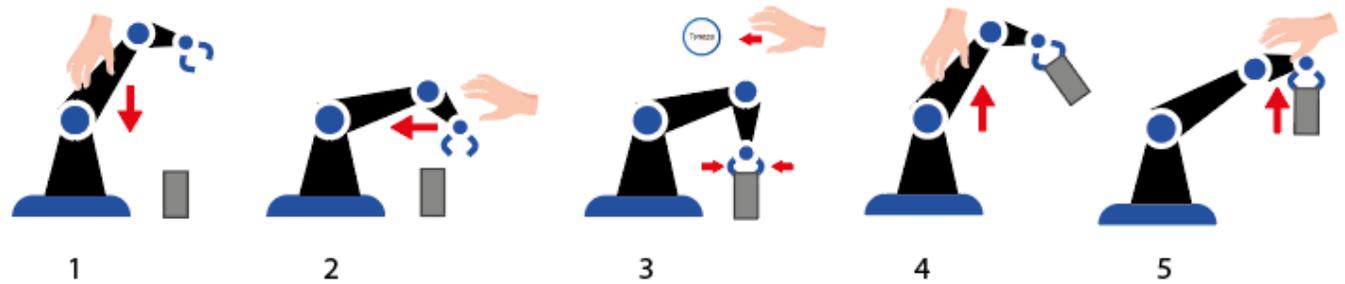
recomendaciones

Trabajos futuros

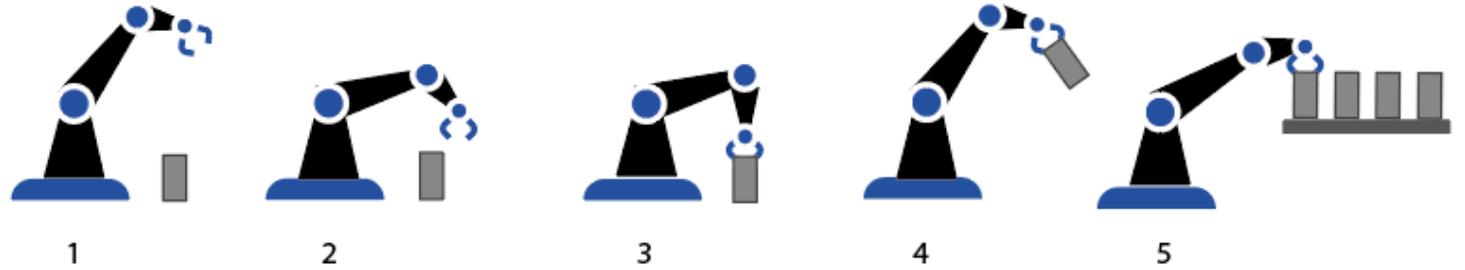
Estructura de formas clave para secuencias de trabajo



Grabado de posiciones



Seguimiento de secuencia grabada





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

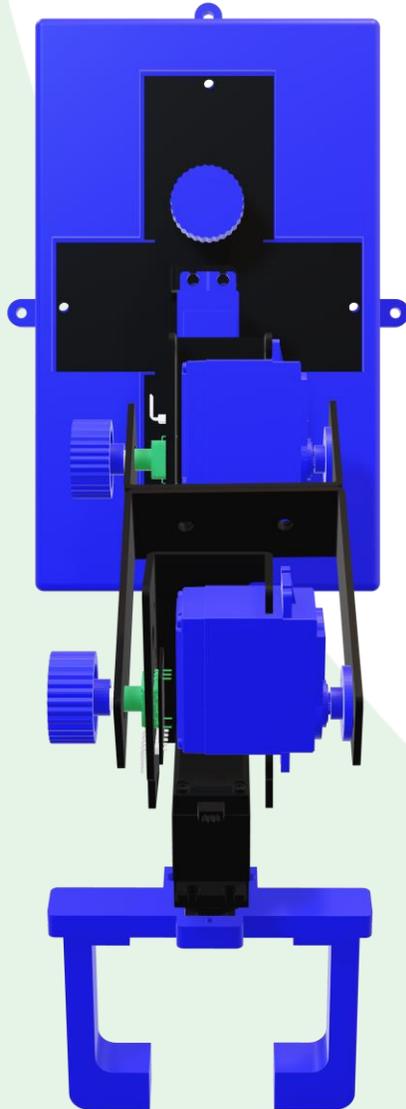
rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Estructura de formas clave para secuencias de trabajo



Información de grabado por pantalla LCD a) Instrucciones, b) Grabado D1, c) Grabado D2, d) Grabado D3, e) Grabado D4.
(Fuente propia)



a)



b)



c)



d)



e)



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

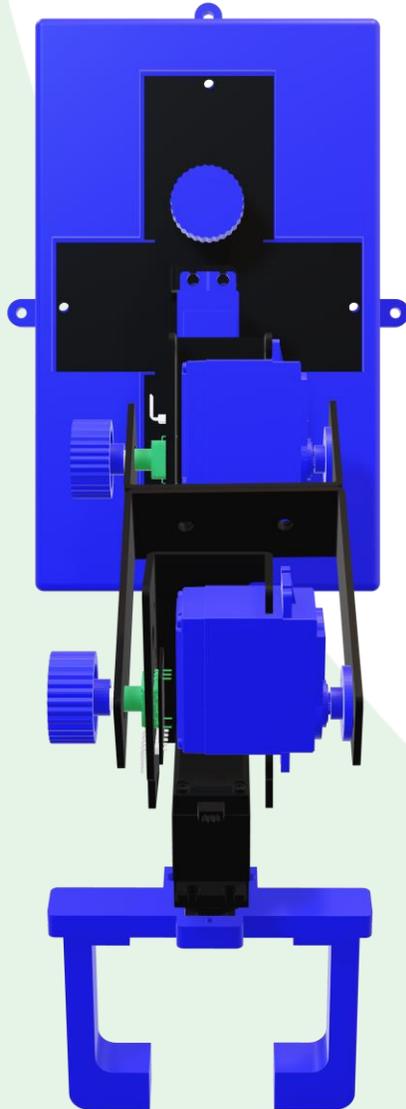
rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Estructura de formas clave para secuencias de trabajo



Información de grabado por pantalla LCD a) Instrucciones, b) Grabado D1, c) Grabado D2, d) Grabado D3, e) Grabado D4.
(Fuente propia)



a)



b)



c)



d)



e)



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Pruebas de rendimiento

La norma (ISO 9283, 1998), que describe una serie de normas internacionales que tratan sobre la manipulación de robots industriales



Alcance

En base a lo anteriormente expuesto por la norma, se lista las siguientes características de rendimiento a ser evaluadas en el cobot:

- Precisión de distancia
- Repetibilidad de distancia



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

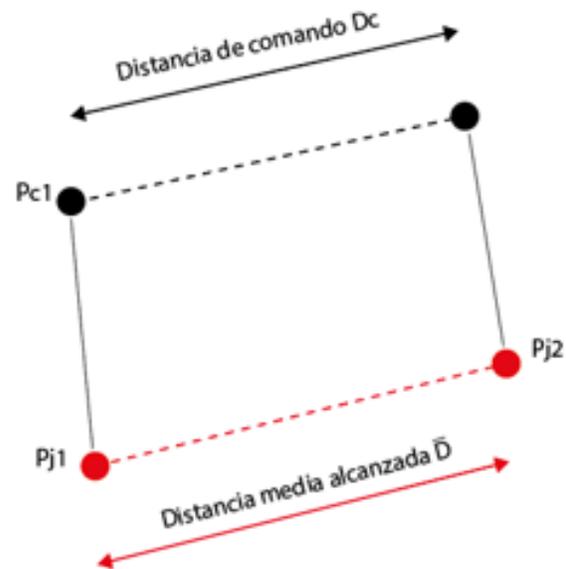
Conclusiones y

recomendaciones

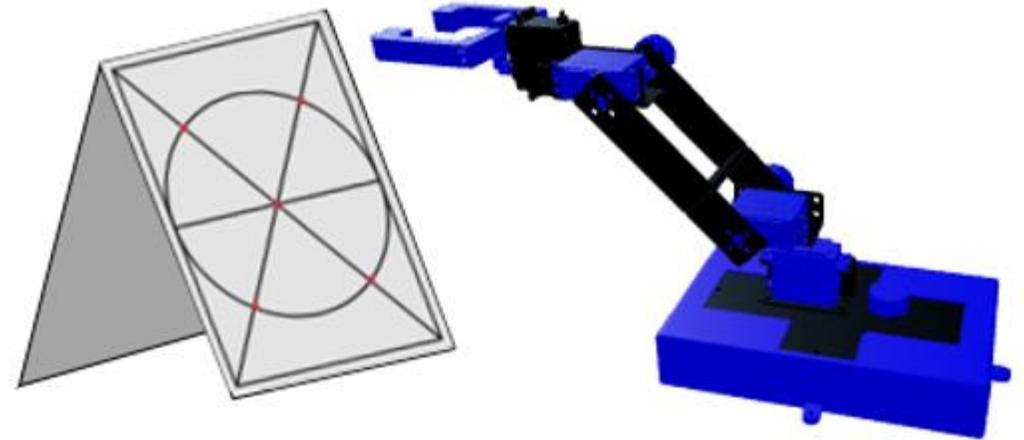
Trabajos futuros

Pruebas de rendimiento

La norma (ISO 9283, 1998), que describe una serie de normas internacionales que tratan sobre la manipulación de robots industriales



Tablero de evaluación





Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

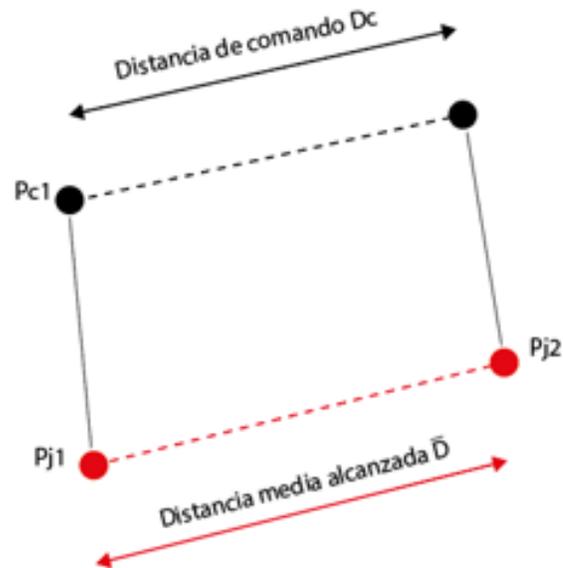
Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Pruebas de rendimiento

La norma (ISO 9283, 1998), que describe una serie de normas internacionales que tratan sobre la manipulación de robots industriales

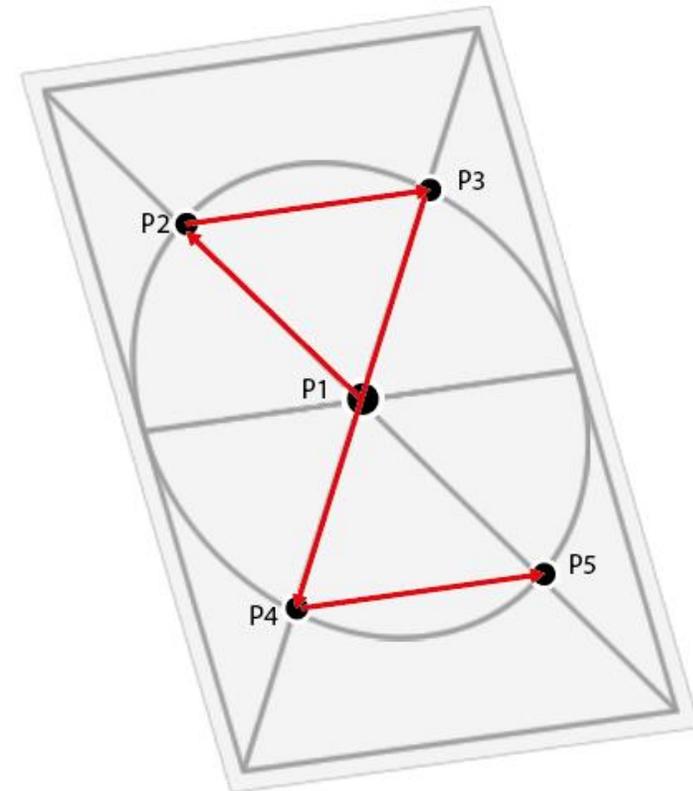


$$AD_p = \bar{D} - D_c$$

Donde:

\bar{D} : Distancia media alcanzada

D_c : Distancia de comando





ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Toma de datos

N° Ciclos	\overline{D}_1 [mm]	D_{e1} [mm]	\overline{D}_2 [mm]	D_{e2} [mm]	\overline{D}_3 [mm]	D_{e3} [mm]	\overline{D}_4 [mm]	D_{e4} [mm]
1	99,7	97	113,3	110,7	192,6	194	99,9	97
2	101,9	97	116,2	110,7	195,5	194	96,1	97
3	96,8	97	108,2	110,7	198,8	194	99,9	97
4	95,4	97	108,3	110,7	196	194	94,7	97
5	98,7	97	116,5	110,7	198,1	194	99,1	97
6	97,1	97	109,9	110,7	192,3	194	96,7	97
7	93,1	97	108,3	110,7	195,9	194	99	97
8	98,8	97	112,1	110,7	195	194	97,4	97
9	101,8	97	115,8	110,7	198	194	99,7	97
10	101,9	97	115,2	110,7	196,3	194	98,9	97
11	98,1	97	109,5	110,7	197,2	194	101,1	97
12	95,1	97	110,7	110,7	198,6	194	101,5	97
13	98,2	97	109,4	110,7	198,4	194	95,2	97
14	93,9	97	114,1	110,7	193	194	99,2	97
15	101,3	97	111	110,7	194,9	194	93,4	97
16	102,9	97	116,1	110,7	197	194	96,1	97
17	94,3	97	108,4	110,7	197,8	194	94,5	97
18	99,6	97	107,2	110,7	194,3	194	101,1	97
19	91,6	97	106,9	110,7	192,2	194	94	97
20	92,1	97	105,7	110,7	190,8	194	94,4	97
21	93,1	97	114,6	110,7	190,9	194	97,4	97
22	102	97	111,3	110,7	197	194	99,2	97
23	93	97	112,9	110,7	196,4	194	97,6	97
24	98,4	97	107,4	110,7	192,7	194	93,4	97
25	100,4	97	112,3	110,7	192,8	194	99,3	97
26	93,8	97	112,7	110,7	197,4	194	96,1	97
27	97,1	97	114,2	110,7	195,6	194	99	97
28	101,1	97	114	110,7	195,3	194	99,8	97
29	96,2	97	111,6	110,7	191,7	194	99,3	97
30	95,1	97	108	110,7	195,4	194	93,9	97
Promedio \overline{D}	97,41666667	97	111,3933333	110,7	195,2633333	194	97,56333333	97
Máximo D_{max}	102,9	97	116,5	110,7	198,8	194	101,5	97
Mínimo D_{min}	91,6	97	105,7	110,7	190,8	194	93,4	97
Dist. AD_p	0,416666667		0,693333333		1,263333333		0,563333333	
Dist. Max $AD_{p max}$	5,9		5,8		4,8		4,5	
Dist. Min $AD_{p min}$	5,4		5		3,2		3,6	



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

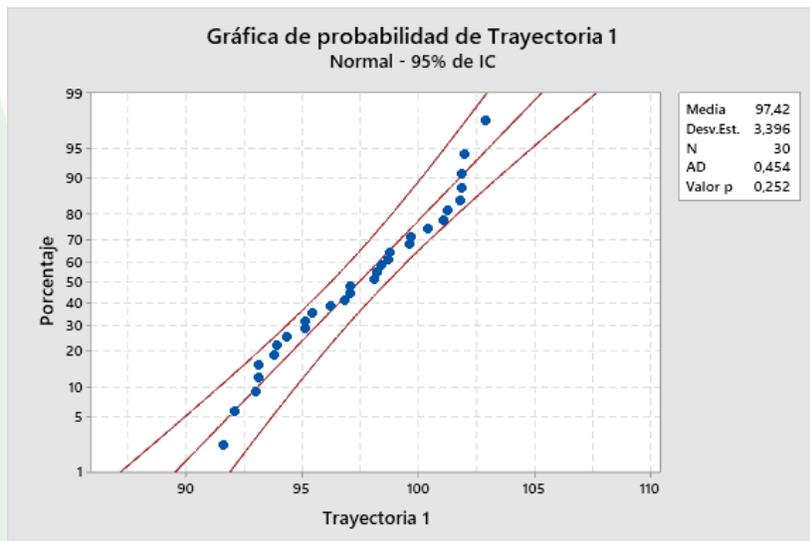
rendimiento

Conclusiones y

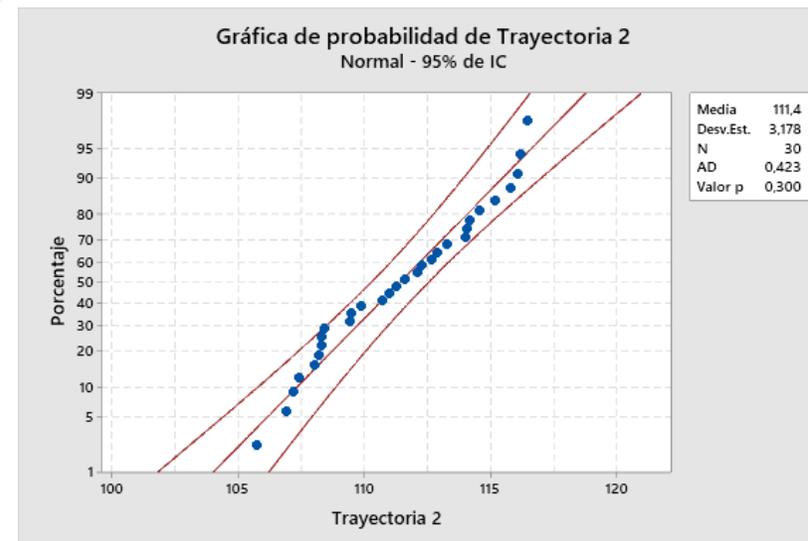
recomendaciones

Trabajos futuros

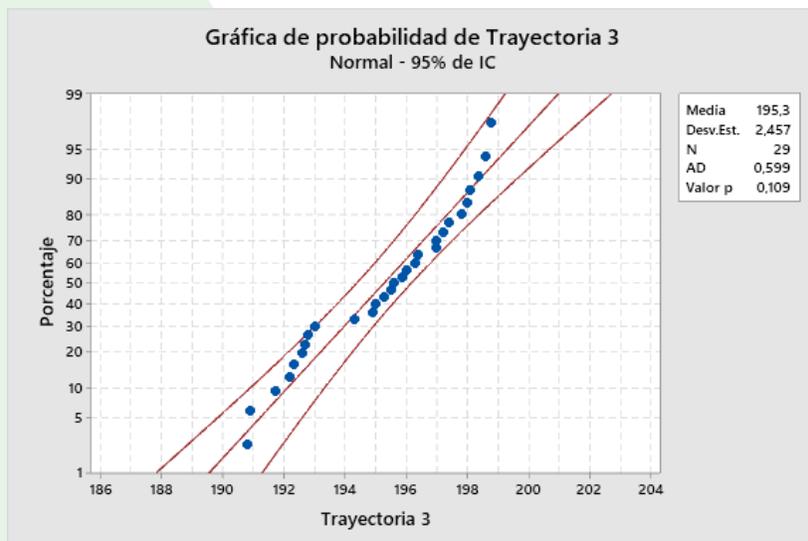
Resultados obtenidos en precisión de distancia



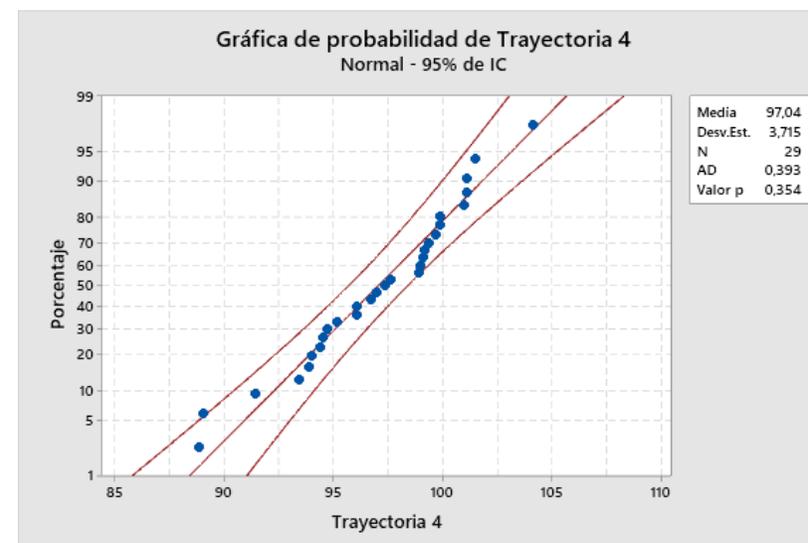
$p = 0.252$



$p = 0.3$



$p = 0.109$



$p = 0.352$



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

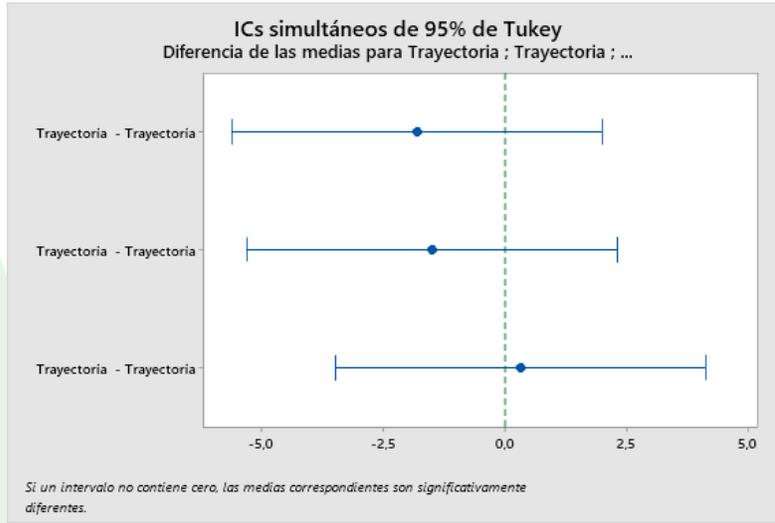
rendimiento

Conclusiones y

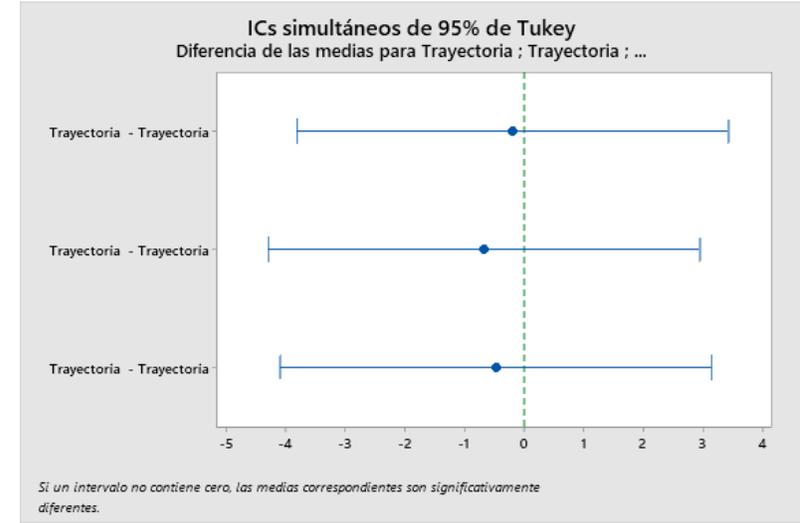
recomendaciones

Trabajos futuros

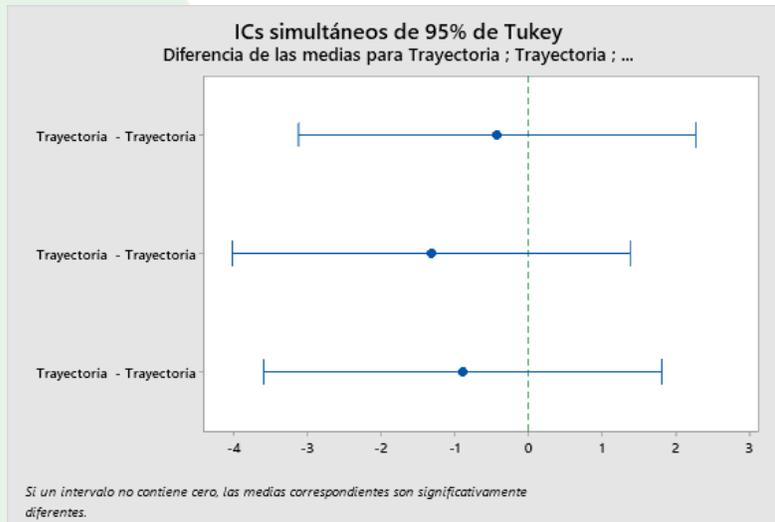
Resultados obtenidos en repetibilidad



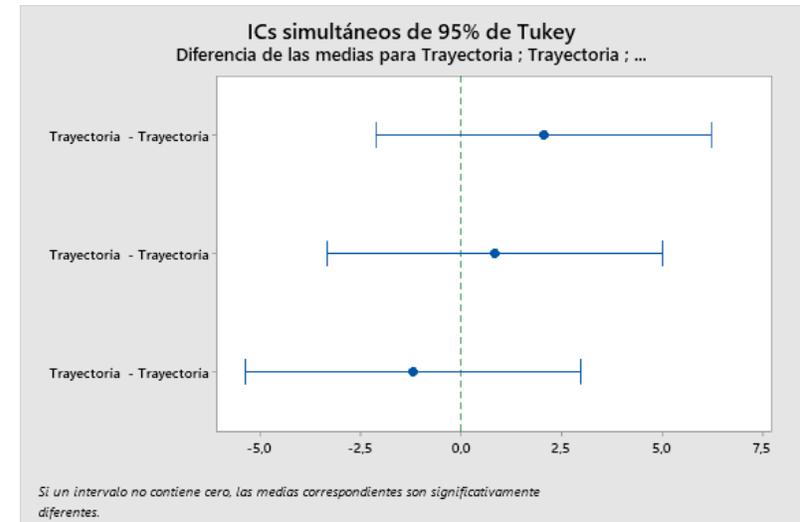
Trayectoria 1



Trayectoria 2



Trayectoria 3



Trayectoria 4



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Resultados obtenidos en repetibilidad

Criterio de aceptabilidad para prueba de repetibilidad seis sigma

Criterio de aceptación	
Abajo de 10 %	Excelente proceso
De 10 a 20 %	Bueno, aceptable
De 20 a 30 %	Marginalmente aceptable
Arriba de 30 %	Inaceptable y debe ser corregido

Porcentaje de repetibilidad para cuatro trayectorias

Porcentaje de Repetibilidad	
Primera trayectoria	14.92 %
Segunda trayectoria	14.24 %
Tercera trayectoria	10.68 %
Cuarta trayectoria	12.19 %



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad, capaz de ejecutar y guardar secuencias de trabajo, por medio de un sistema de guiado manual, con respecto al grabado convencional de instrucciones, el cobot desarrollado no demanda de experiencia previa del usuario en cuanto a programación, permitiendo mover cada articulación y guardar el progreso paso a paso, al finalizar el grabado, los cambios de posición forman parte de una colección de instrucciones, que el cobot interpreta como una nueva secuencia de trabajo lista a ser elegida según la necesidad.



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se dimensionó y seleccionó servomotores capaces de mover el cobot, con suficiente potencia y precisión para garantizar un desempeño óptimo en cada operación realizada. Por medio de cálculos de cinemática y dinámica del equipo se comprueba la eficacia de los actuadores elegidos, que gracias a su torque de 35 kgf.cm, no solo permite cumplir las expectativas de funcionamiento, también brinda la seguridad de incrementar las prestaciones del equipo con piezas modulares en su actuador final,



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se implementó un sistema de grabado cómodo e intuitivo por medio de encoders absolutos, permitiendo al usuario girar las perillas correspondientes a cada motor y ver en tiempo real el cambio de posición en cada articulación, este principio de grabado aporta un mayor control en la trayectoria y un mejor ajuste de precisión, además de observar de manera digital en el software de control y monitoreo los grados que ha girado cada eje, se incorpora una pantalla led con instrucciones de grabado para comodidad del usuario.



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se incorporó una interfaz multiplataforma para el control y monitoreo en tiempo real del cobot, capaz de comunicarse con el sistema operativo ROS, la plataforma puede soportar conexiones simultaneas, gestionar el envío de señales, controlar la velocidad, ejecutar paros en la trayectoria del equipo físico y simular la trayectoria programada con un gemelo digital, el cual puede ser inspeccionado en tres dimensiones en todo momento por el o los usuarios conectados.



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se realizó la validación del cobot por medio de la norma ISO 9283, guía que establece criterios de análisis de prestaciones y métodos de ensayos relacionado con equipos robóticos. Los ítems de valoración son: precisión de distancia y repetibilidad de distancia. En cada uno de ellos se obtiene resultados satisfactorios, en base a datos recolectados de 5 puntos evaluados con treinta mediciones cada uno. Dentro del primer estudio por medio del análisis estadístico de normalidad se halla uniformidad y linealidad en las lecturas registradas con un porcentaje de confiabilidad del 95% se acepta la hipótesis nula, la cual concluye que las variaciones registradas en el conjunto de datos no son significativas. Dentro del segundo análisis de repetibilidad apoyados en la guía estadística seis sigma se determina un porcentaje de repetibilidad entre el 10 % y el 20 %, que corresponde a un desempeño bueno y aceptable.



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Recomendaciones

- Se recomienda ampliar los grados de libertad del cobot para tener una mayor flexibilidad en sus movimientos, por medio de desacople cinemático, el equipo puede realizar acciones de transporte de piezas considerando distancia y orientación.
- Se recomienda usar el modo de grabado para simular las trayectorias y familiarizarse con el funcionamiento tanto de la interfaz como del cobot físico, una vez comprendido la funcionalidad de los comandos de pausas y velocidad de ejecución, el usuario debe ubicar el cobot en una superficie estable y libre de elementos que puedan interrumpir el desempeño del equipo.
- Los servomotores del cobot funcionan a voltios DC, la fuente de alimentación original suministra la potencia necesaria para mover todo el equipo, en caso de cambiarla o repotenciarla se recomienda realizar un adecuado dimensionamiento y planilla de consumo energético.



ECUADOR

Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Recomendaciones

- Debido a que el cobot funciona con sistema operativo ROS, para ejecutar la interfaz de monitoreo y control, se recomienda usar un computador con los siguientes requisitos mínimos: Procesador core i5 de 6ta generación o su equivalente, memoria ram de 8GBs, tarjeta gráfica incorporada al computador y una conexión de red estable con velocidad mínima de 2 Mbps.
- Para el apartado de grabado, recomienda optimizar las trayectorias, estableciendo variaciones de posiciones en más de un actuador a la vez, salvo en las acciones en sujeción o liberación de la pieza que se esté trasladando. El usuario debe tomar en cuenta que la creación de más puntos de grabado significa un mayor tiempo de ejecución en la trayectoria total.



Introducción

Investigación previa

Metodología

Diseño y

construcción

Pruebas de

rendimiento

Conclusiones y

recomendaciones

Trabajos futuros

Trabajos futuros

- Diseñar y construir un cobot de 6 grados de libertad con desacople cinemático y control independiente de cada articulación, con un modo de grabado orientado a la enseñanza de robótica con simulación de movimiento bajo sistema operativo ROS.
- Implementar un sistema de seguridad basado en visión artificial que coordine la ejecución de movimientos, dependiendo de la cercanía de objetos o personas, variando su velocidad y torque.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN