

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 e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop.”

Autores: Casco Cabrera, Danny Paúl
Pérez Aldaz, Ronnie Damián

Director: Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

Latacunga, 2022



CONTENIDO



- Antecedentes
- Diseño y selección de dispositivos
- Implementación
- Desarrollo HMI
- Desarrollo de la plataforma IOT
- Pruebas y Análisis de resultados
- Conclusiones y Recomendaciones

ANTECEDENTES

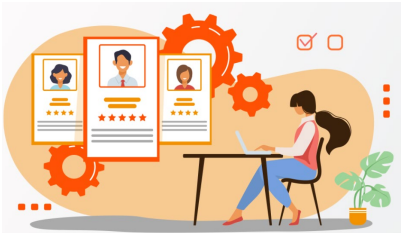
Planteamiento del problema



Productos de 1ra necesidad



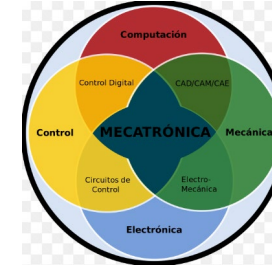
Automatización



Empleabilidad



Justificación



Sistemas mecatrónicos



Industria 4.0



Brazos robóticos



INTRODUCCIÓN

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop.



INTRODUCCIÓN

Objetivos Específicos

Determinar el modelo matemático y secuencias de funcionamiento de las etapas: molienda, llenado y transportación para la producción de harina de trigo e investigar en bases de datos científicas el método de parámetros DH (Denavit Hartenberg).

Plantear los algoritmos de control para los procesos y subprocesos de las etapas molienda, llenado y transportación para la producción de harina de trigo, y plantear el algoritmo de control avanzado MIMO

Desarrollar el entorno virtual inmersivo e interactivo para el usuario.



INTRODUCCIÓN

Objetivos Específicos

Diseñar e implementar la instrumentación (sensores, actuadores, etc.) necesaria para el funcionamiento de los procesos dentro de la producción de harina de trigo.

Implementar el control automático del proceso mediante la técnica de Hardware in the loop..

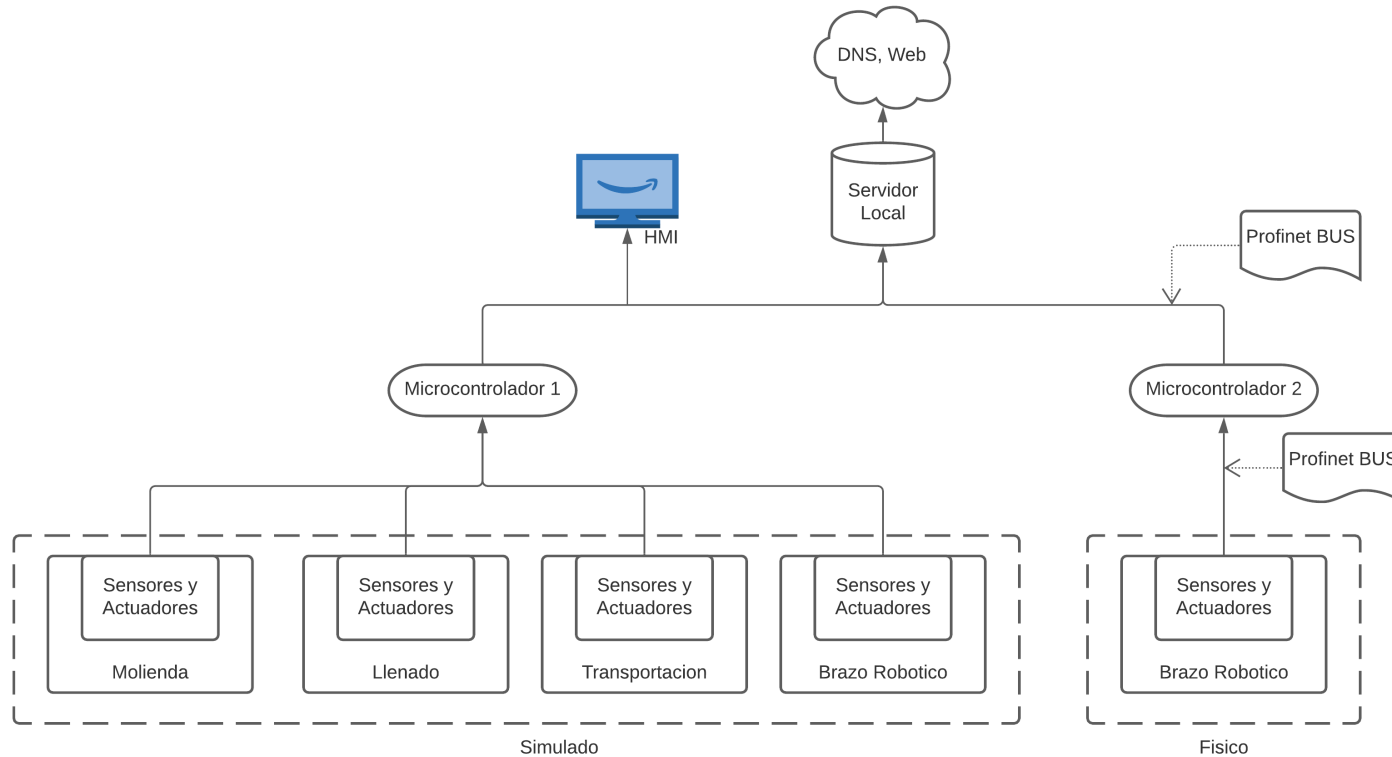
Desarrollar un servidor web para la plataforma IoT del proceso de producción de harina de trigo..

Evaluar el desempeño del sistema de control implementado con la técnica Hardware in the loop.



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

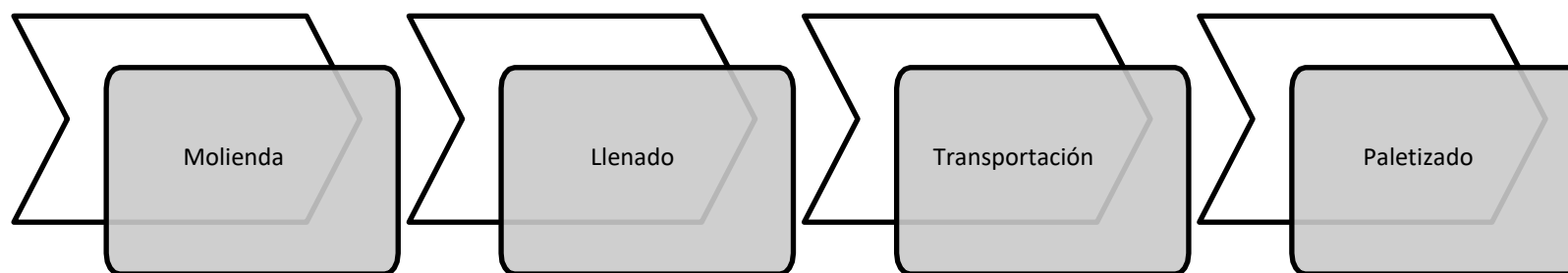
Entorno virtual - físico



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

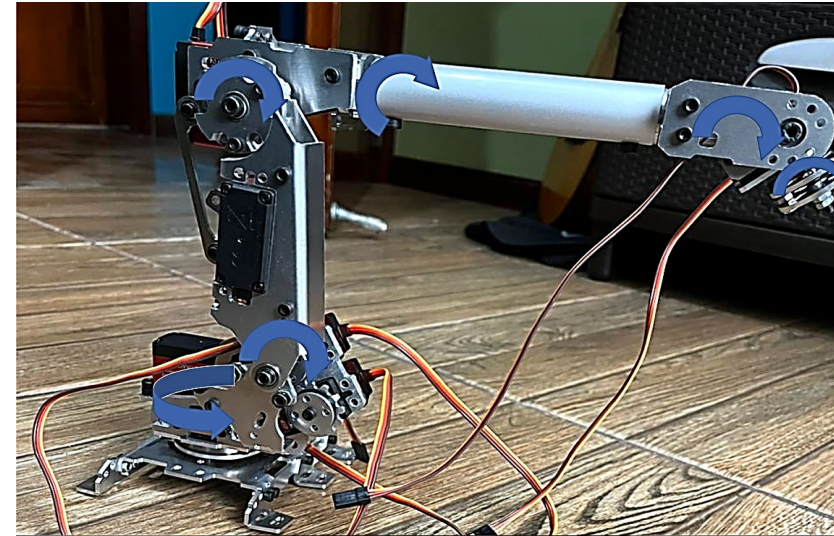
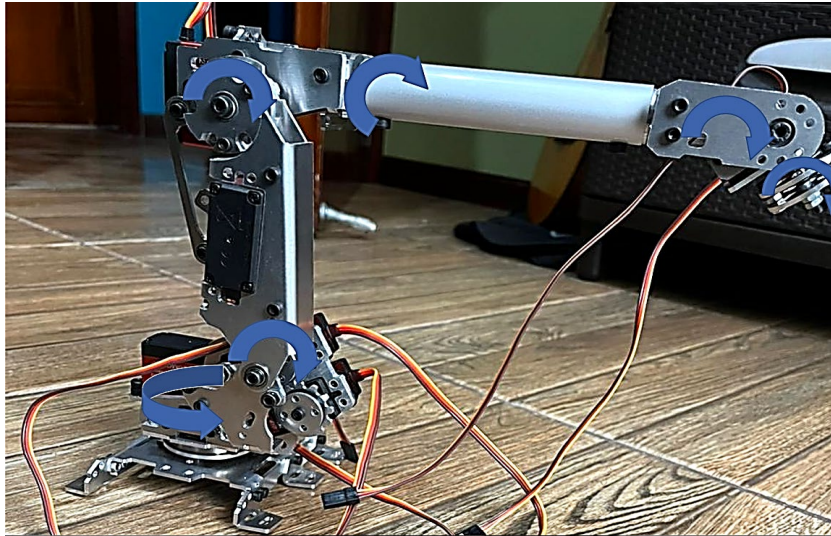


Secuencias de funcionamiento



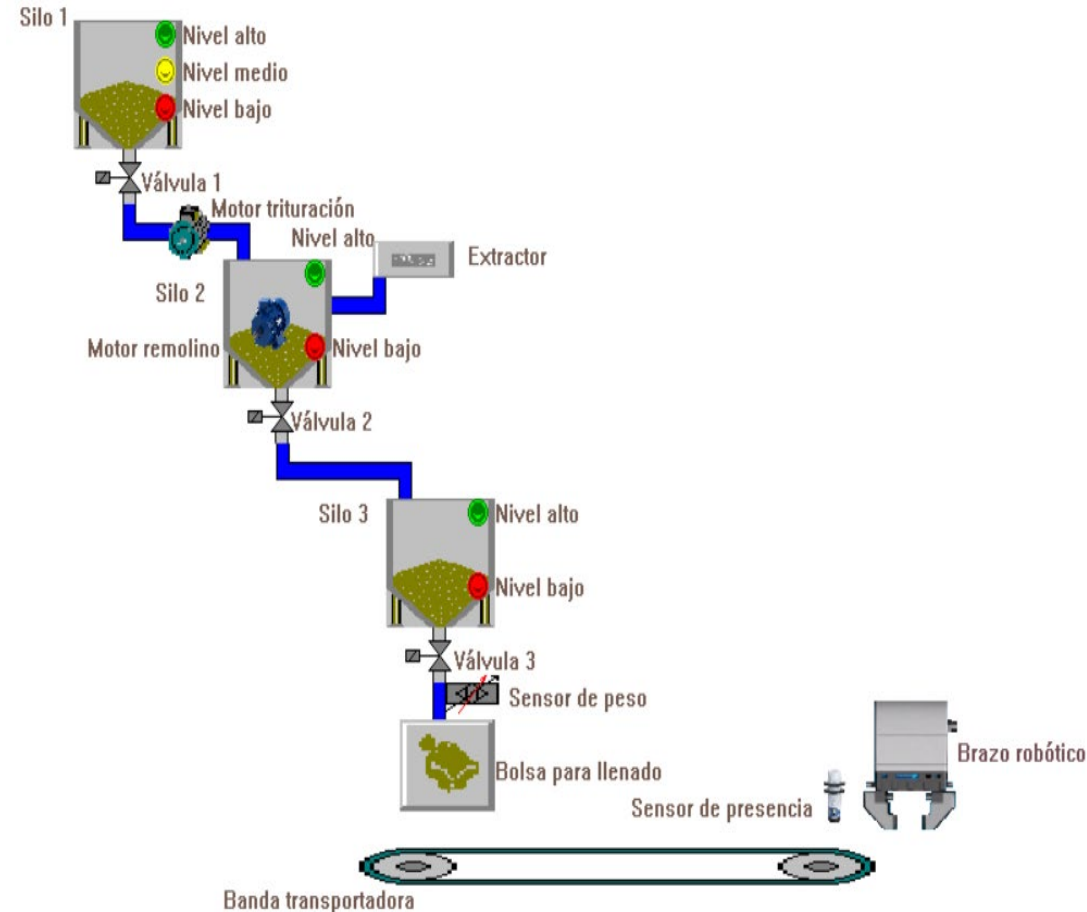
DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Modelo matemático robot 6GDL



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

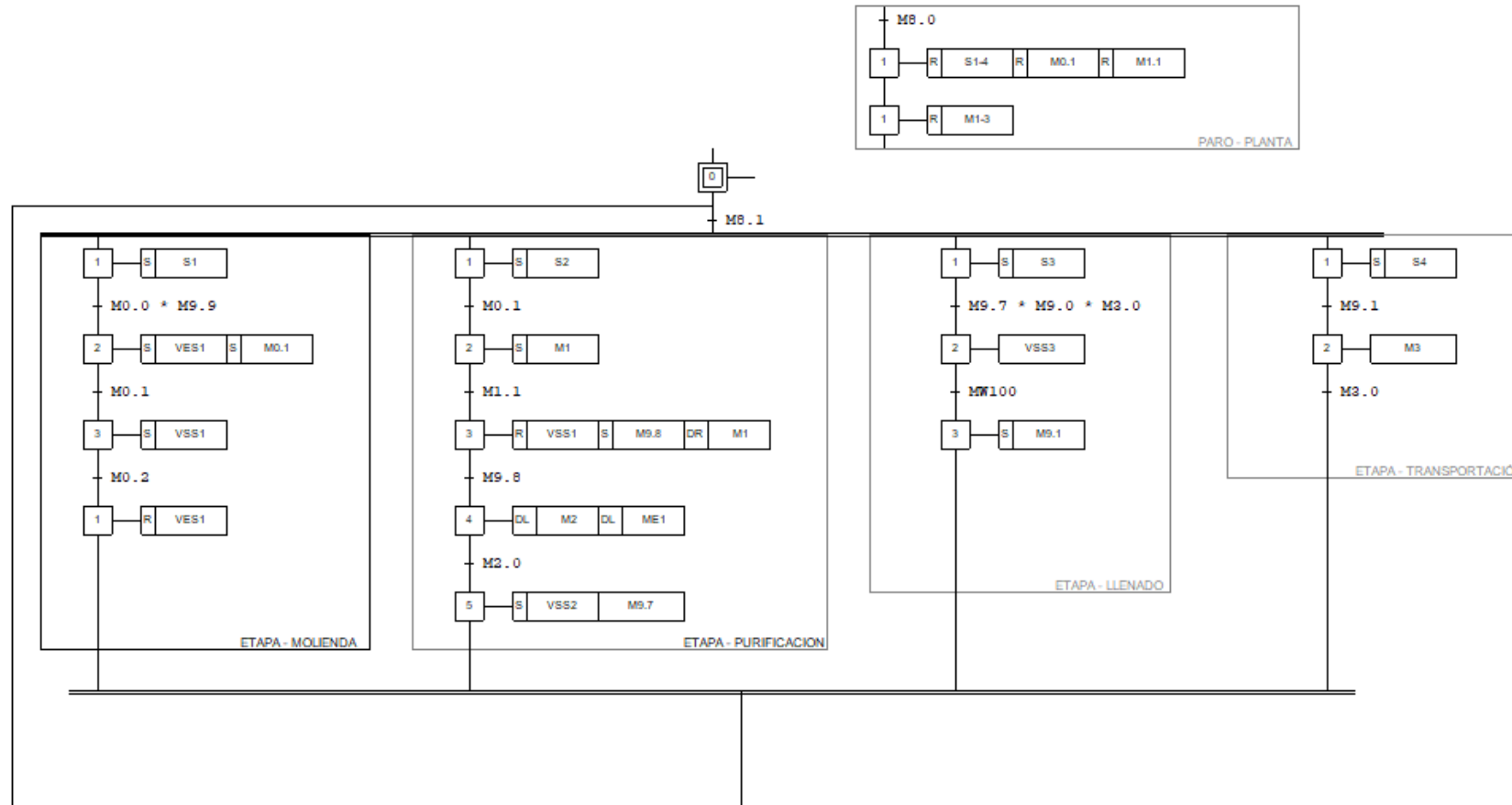
Automatización de procesos y subprocesos



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

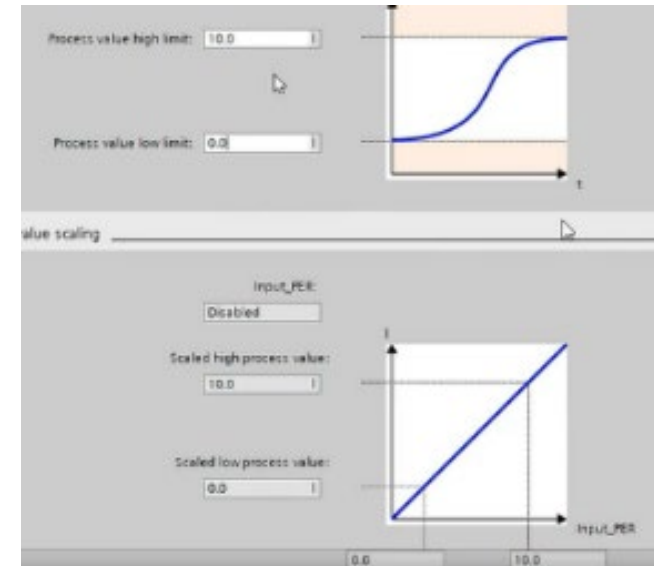
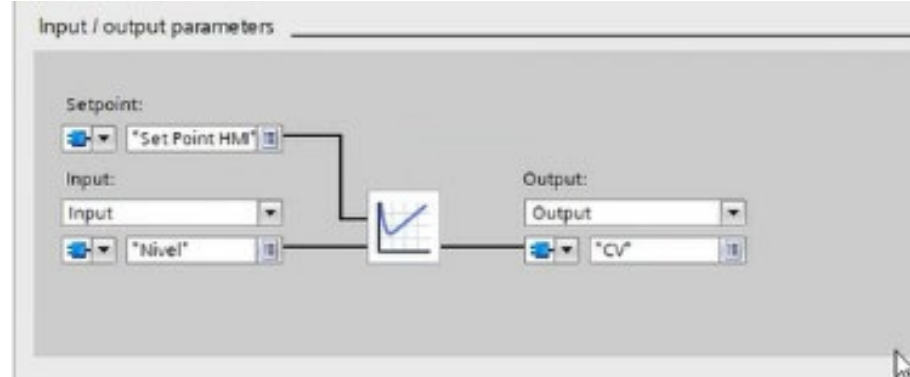


Programación para PLC



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

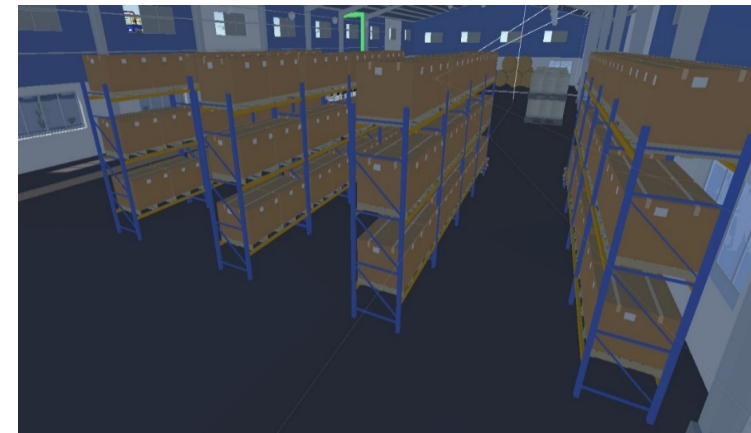
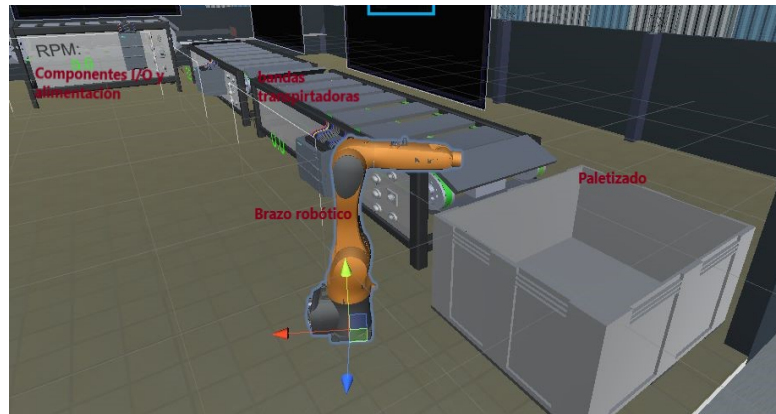
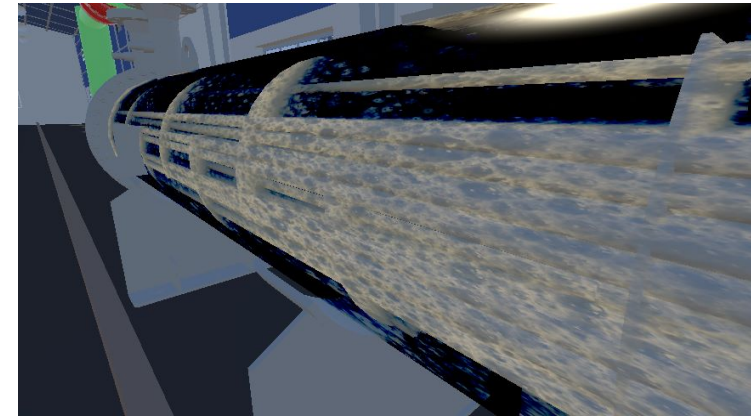
Controlador PID molienda





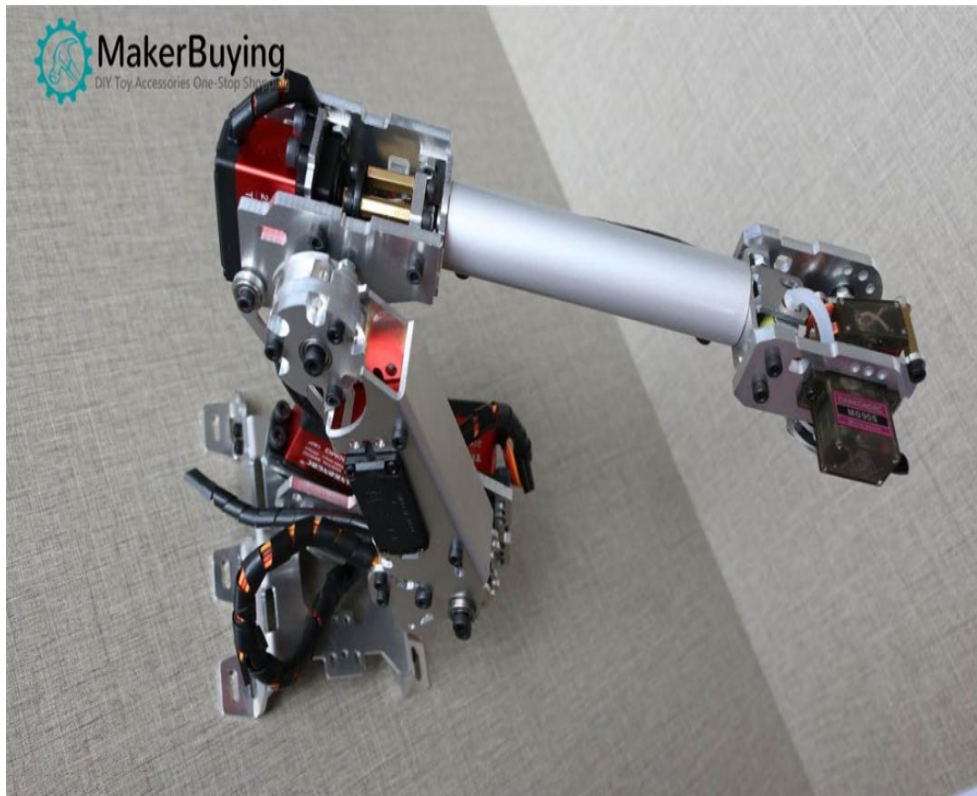
DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Entorno Virtual Unity 3D



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

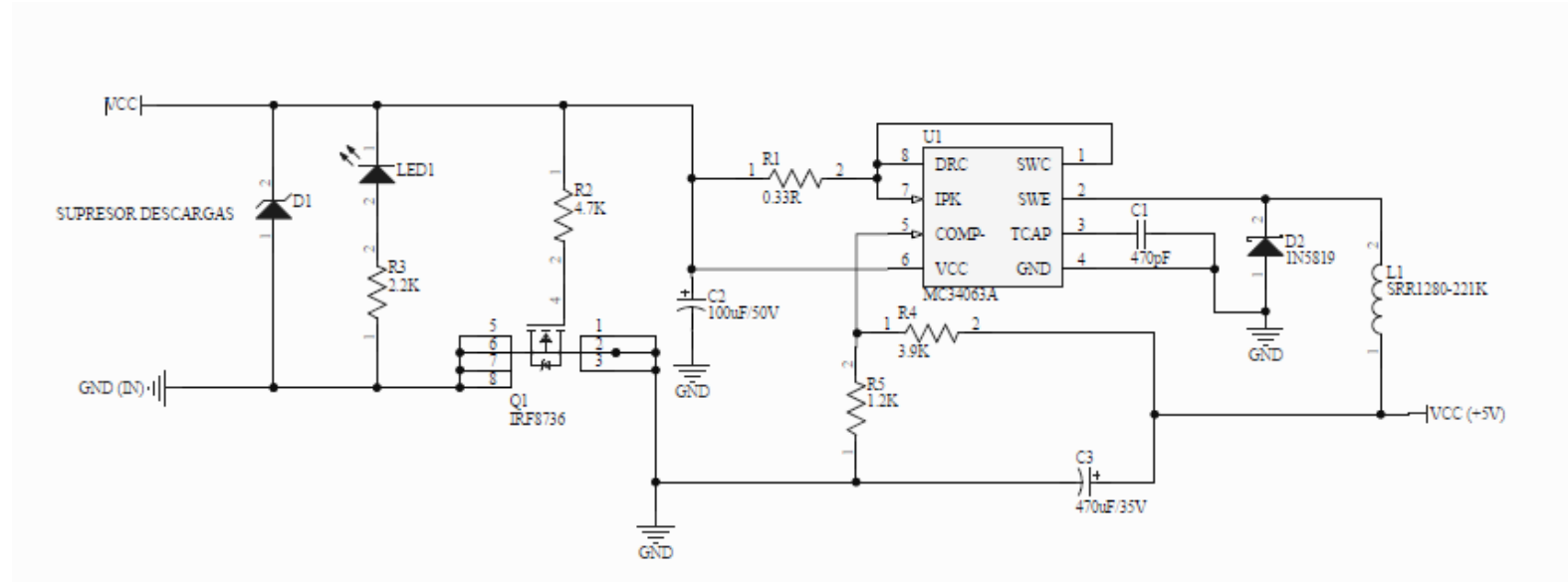
Selección de brazo robótico



Torque máximo	51 onzas-in
Velocidad máxima	0,15s/60 grados
Desplazamiento angular	90 grados
máximo	
Sistema de control	Analógico, por ancho de pulso
Posición neutral	1,5ms
Voltaje de operación	4,8-6,0 V
Velocidad(6V)	0,15s/60 grados
Torque(4,8V)	42 onzas*in(3kg-cm)
Torque(6V)	51 onzas*in(3,7kg-cm)
Dirección	Multidireccional

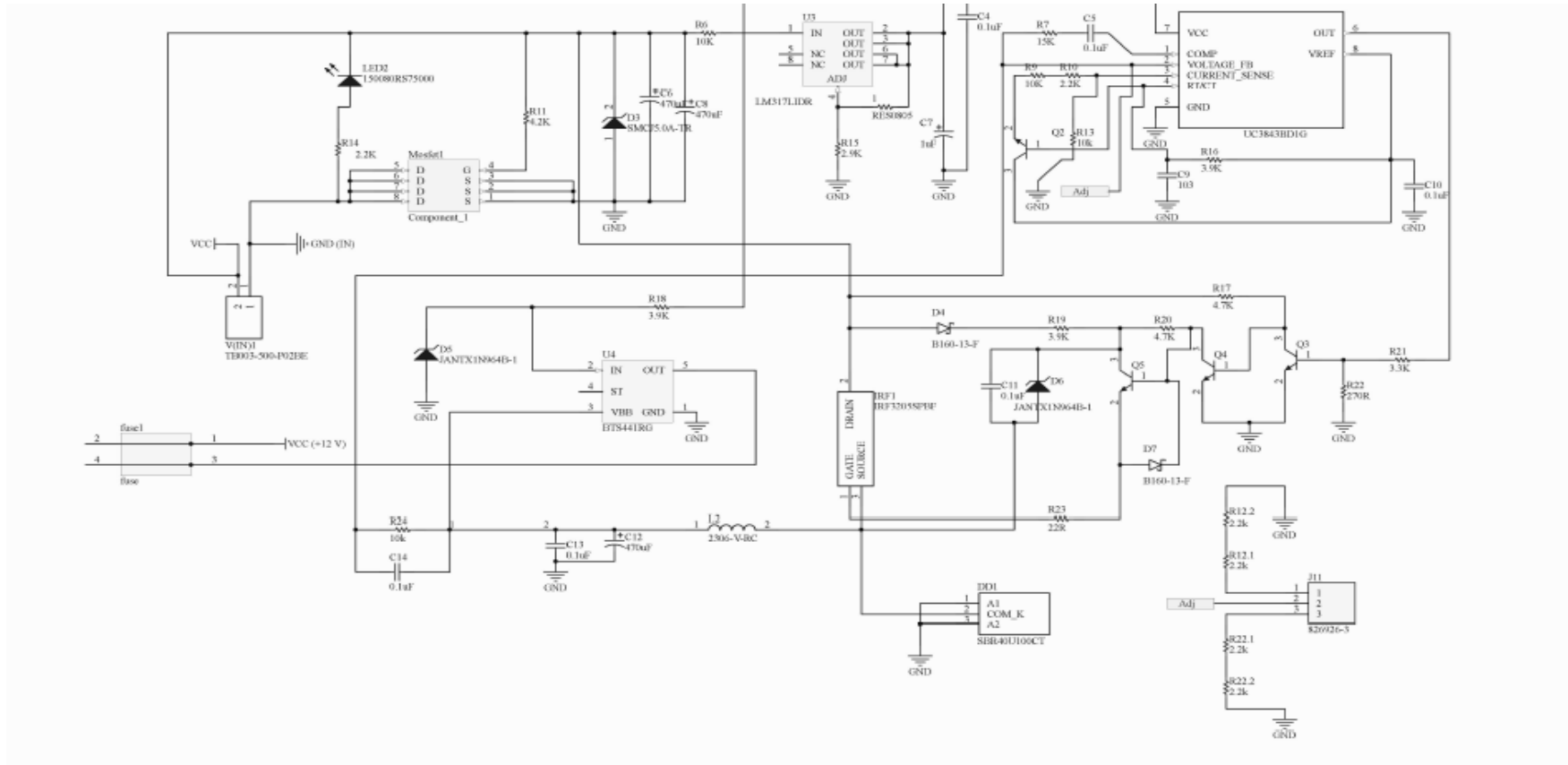
DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Esquemático convertidor BUCK



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

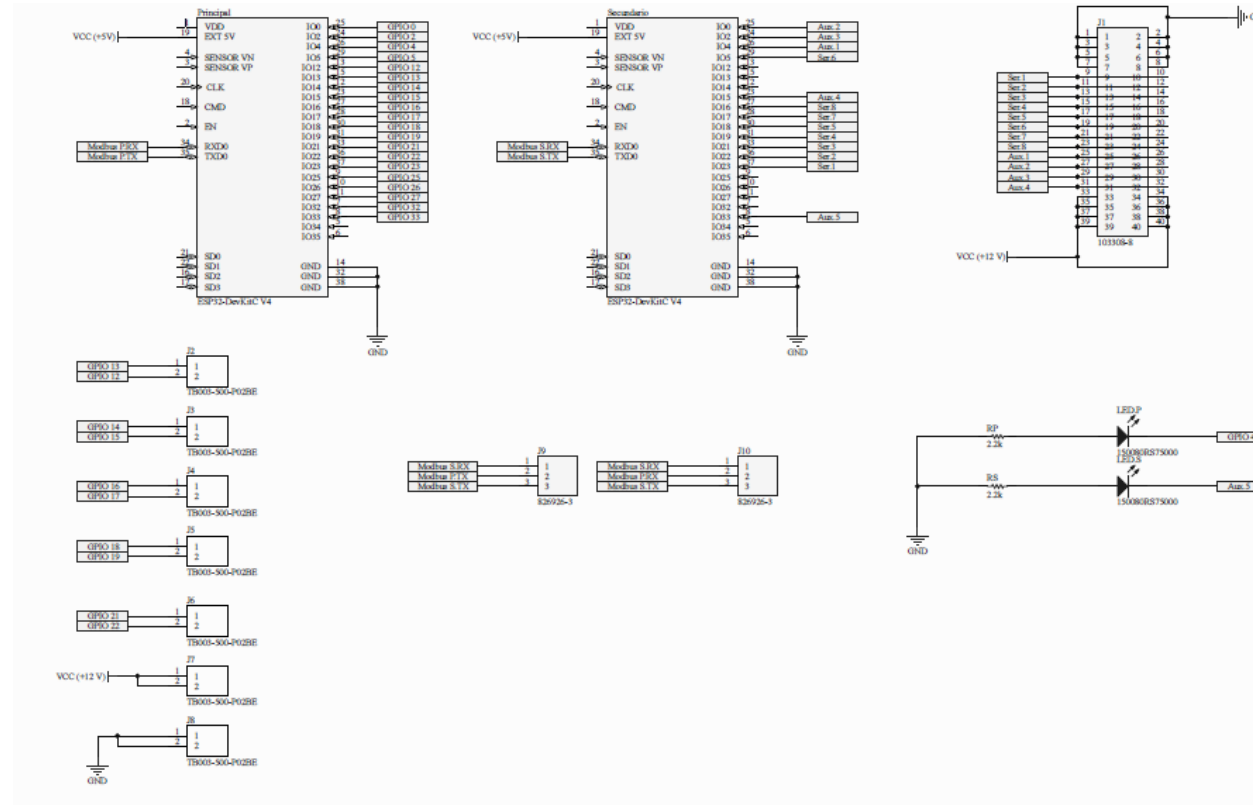
Esquemático convertidor BUCK-BOST





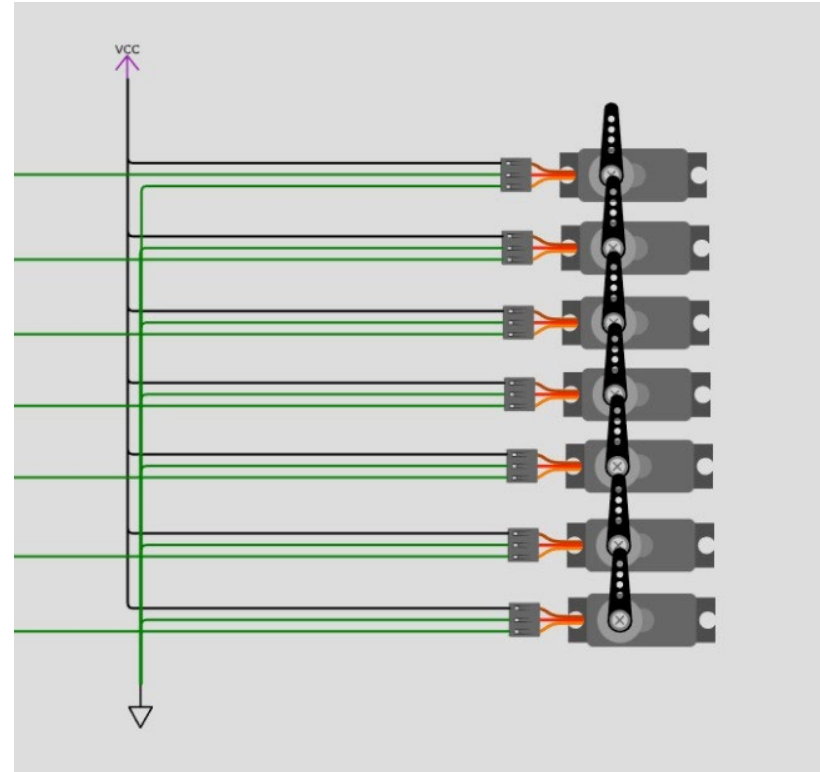
DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Esquemático conexión para microcontroladores



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Diagrama de conexión servomotores



IMPLEMENTACIÓN

Elaboración placa PCB



Drill and mil, pulido de la PCB



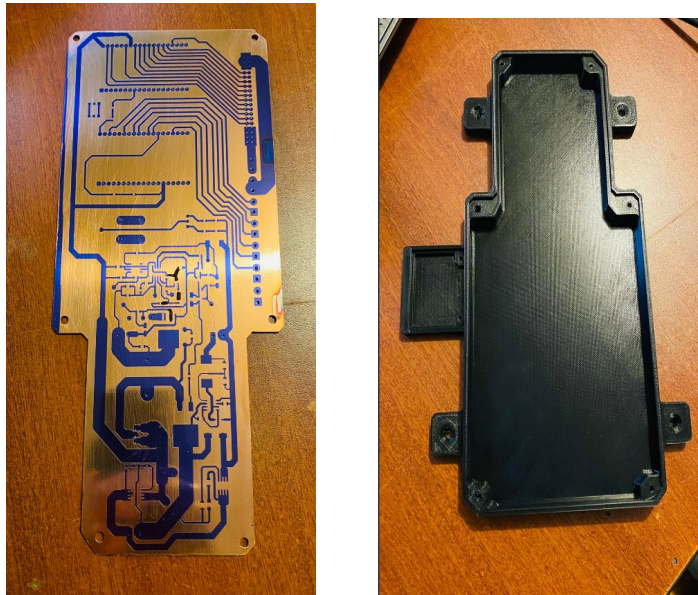
Metalizado, exposición en ácido y máscara anti suelda



IMPLEMENTACIÓN

Elaboración placa PCB

Placa terminada e impresión de base



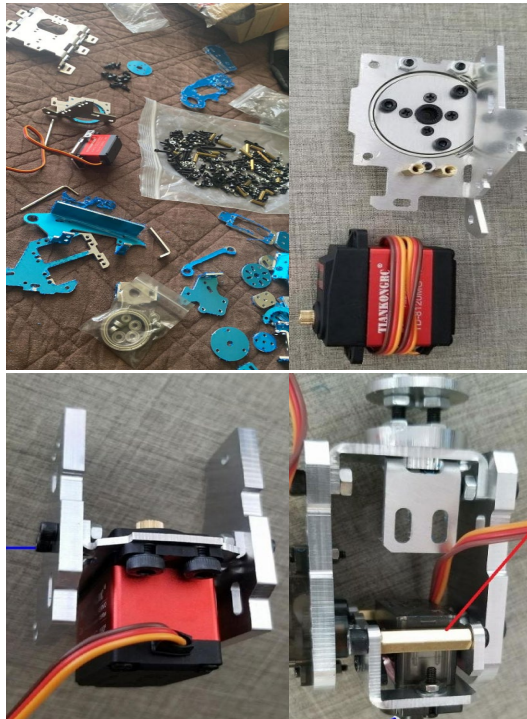
Colocación componentes SMD



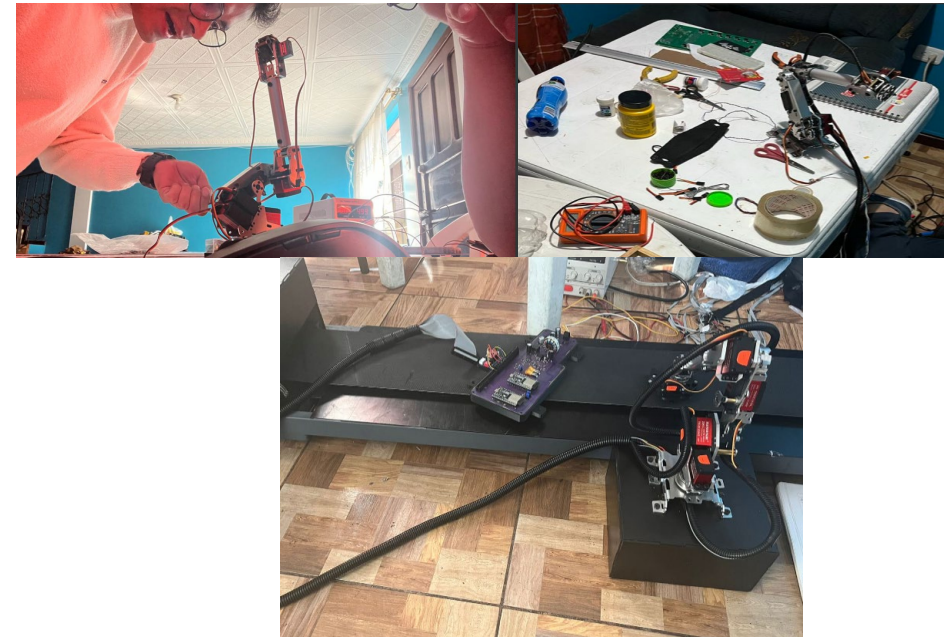
IMPLEMENTACIÓN

Armado y cableado Robot 6GDL

Armado del brazo robótico



Cableado brazo Robótico



DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Diseño HMI Nextion editor

10 Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPEL

11 Ingeniería Mecatrónica

12 Proceso de Producción de harina de trigo

13 Tutor: Ing. Edwin Pruna

14 Autores: Paúl Casco
Ronnie Pérez

15 

16 

b0 Planta

10 Silo de almacenado de trigo

11 Molienda del trigo

12 Nivel alto

13 Nivel medio

14 Nivel bajo

15 Motor moliendo

16 Válvula 1

b1 Inicio

b0 Siguiente

10 Silo 2

11 Silo 3

12 Extracción de impurezas y compresión

13 Motor remoliendo

14 Nivel alto

15 Nivel bajo

16 Válvula 2

17 Almacenamiento para llenado de sacos

18 Nivel alto

19 Nivel bajo

20 Válvula 3

b1 Inicio

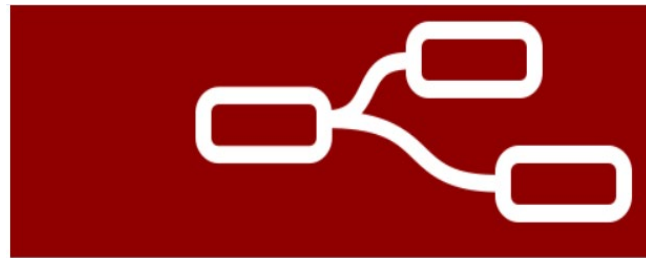
b0 Regresar

b2 Siguiente

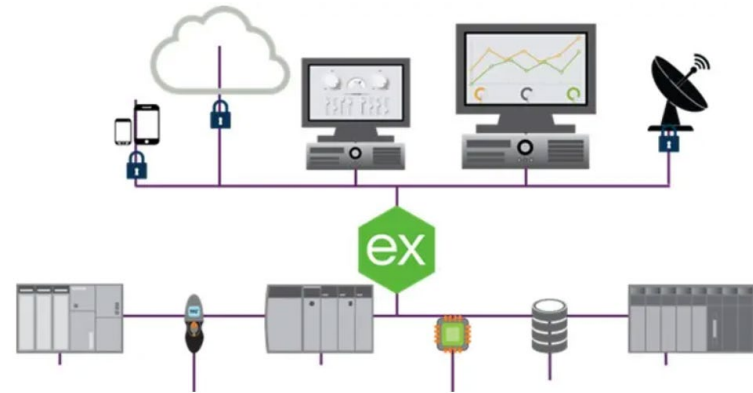


DESARROLLO DE LA PLATAFORMA IoT

Componentes

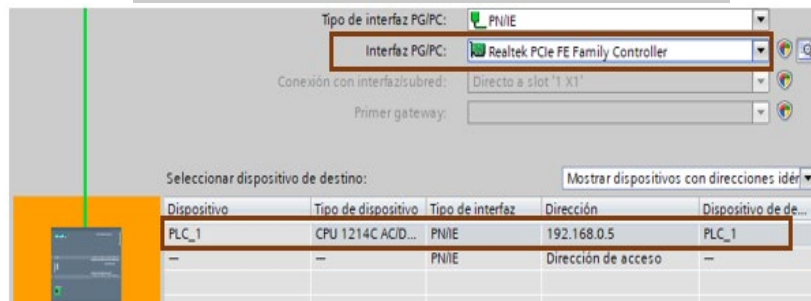
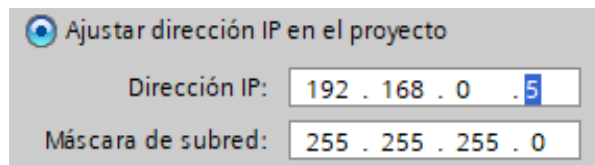
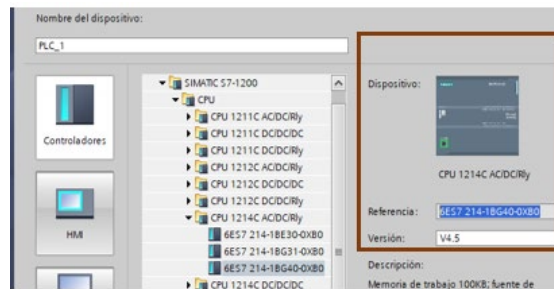


Node-RED



Desarrollo Plataforma IoT

Programación PLC



Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Seppoint	St...
Static									
Client 1 NIVEL_TANK_1	Int	0.0	0						
Client 1 NIVEL_TANK_2	Int	2.0	0						
Client 1 Contador 1	Int	4.0	0						
Client 1 Contador 2	Int	6.0	0						
Client 1 Contador 3	Int	8.0	0						
Client 1 Actuador 1	Bool	10.0	false						
Client 1 Actuador 2	Bool	10.1	false						
Client 1 Actuador 3	Bool	10.2	false						
Client 1 Actuador 4	Bool	10.3	false						
Client 1 Start HMI	Bool	10.4	false						
Client 1 Stop HMI	Bool	10.5	false						
Client 1 Status	Bool	10.6	false						
Client 1 Reset Conters	Bool	10.7	false						
Client 1 Valve 1 ON	Bool	11.0	false						
Client 1 Valve 1 OFF_1	Bool	11.1	false						
Client 1 Valve 2 ON	Bool	11.2	false						
Client 1 Valve 2 OFF	Bool	11.3	false						
Client 1 Tank 1 reset	Bool	11.4	false						
Client 1 Tank 2 reset	Bool	11.5	false						

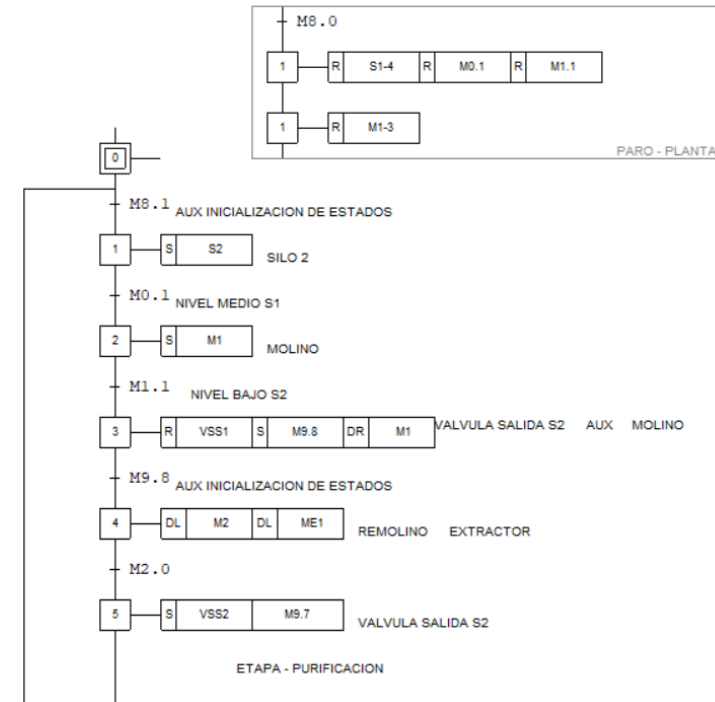
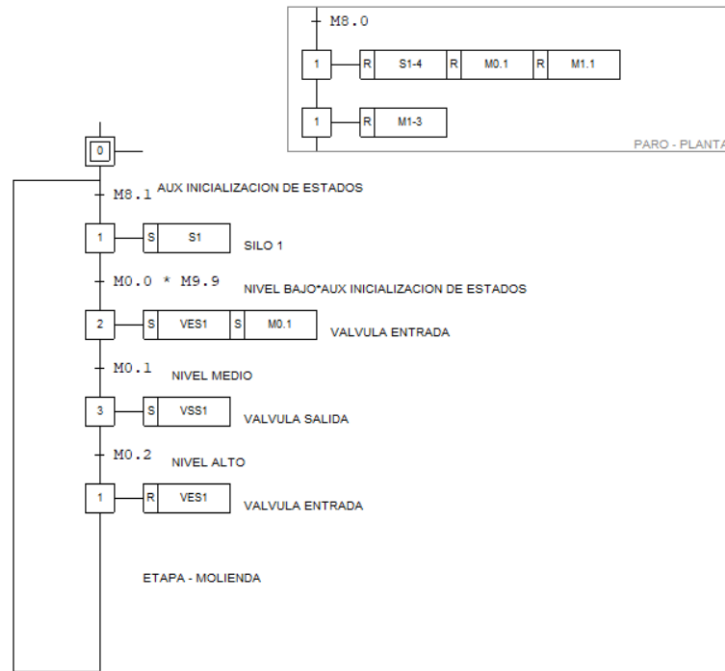
Name	Data type	Offset	Start value	Monitor value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Seppoint	Supervis...
Static										
Client 2 Sensor	Int	0.0	0							
Client 2 Set Point	Int	2.0	0							
Client 2 CV	Int	4.0	0							
Client 2 KP	Int	6.0	0							
Client 2 Ki	Int	8.0	0							
Client 2 KD	Int	10.0	0							
Client 2 Manual Control	Bool	12.0	false							
Client 2 Valve 1	Bool	12.1	false							
Client 2 Valve 2	Bool	12.2	false							
Client 2 Start HMI	Bool	12.3	false							
Client 2 Stop HMI	Bool	12.4	false							

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Seppoint	Supervis...	Comment
Static										
Client 2 Sensor	Int	0.0	0							
Client 2 Set Point	Int	2.0	0							
Client 2 CV	Int	4.0	0							
Client 2 KP	Int	6.0	0							
Client 2 Ki	Int	8.0	0							
Client 2 KD	Int	10.0	0							
Client 2 Manual Control	Bool	12.0	false							
Client 2 Valve 1	Bool	12.1	false							
Client 2 Valve 2	Bool	12.2	false							
Client 2 Start HMI	Bool	12.3	false							
Client 2 Stop HMI	Bool	12.4	false							



Desarrollo Plataforma IoT

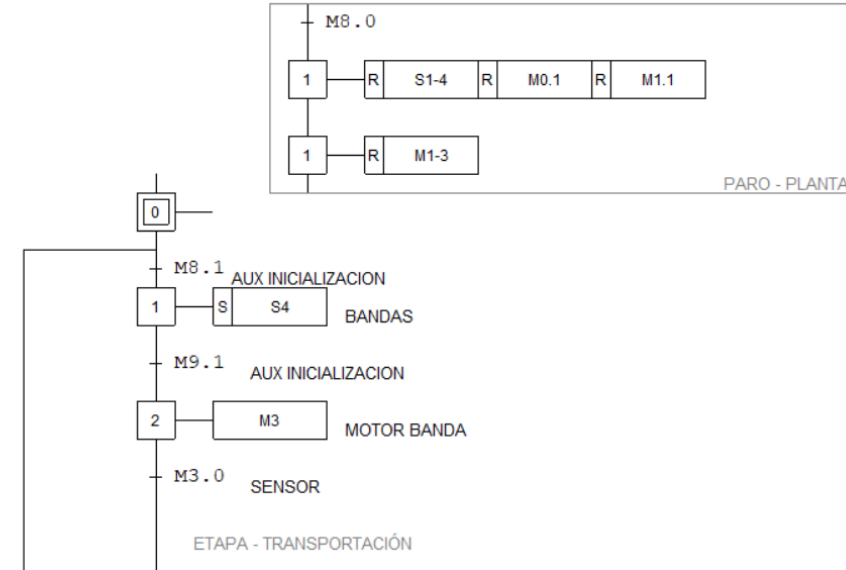
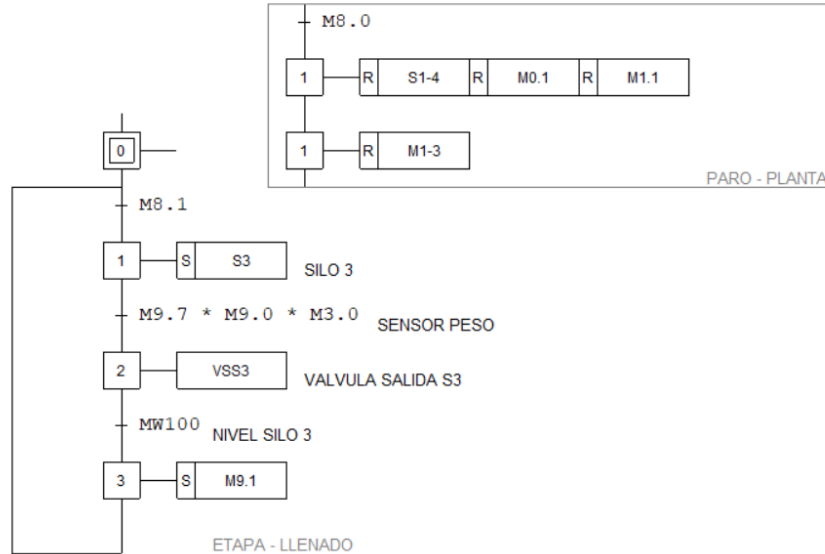
Programación PLC





Desarrollo Plataforma IoT

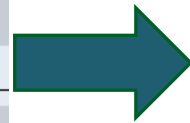
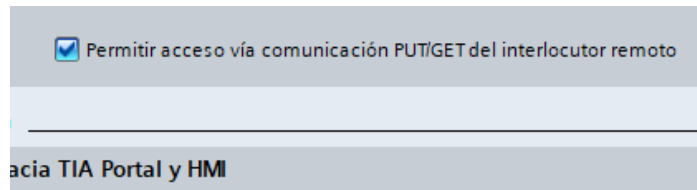
Programación PLC





Desarrollo Plataforma IoT

Node-RED



```
node-red
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-element-paper-switch
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-element-paper-tabs
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-theme-blue-night
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-theme-dark-mint
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-theme-midnight-blue
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] found element @feezal\feezal-theme-solarized-light
httpadminRoot /
httpRoot /
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] server path /feezal
20 Feb 23:45:54 - [info] [feezal] persistence path \Users\User\.node-red\feezal
20 Feb 23:45:54 - [info] mDashboard version 2.19.4-beta started at /mui
20 Feb 23:45:54 - [info] Dashboard version 2.28.2 started at /ui
(node:11732) UnhandledPromiseRejectionWarning: FetchError: request to https://raw.githubusercontent.com/google/material-design-icons/master/font/MaterialIcons-Regular.codepoints failed, reason: getaddrinfo ENOTFOUND raw.githubusercontent.co
    at ClientRequest.<anonymous> (C:\Users\User\.node-red\node_modules\node-fetch\lib\index.js:1585:11)
    at ClientRequest.emit (events.js:315:20)
    at TLSSocket.socketErrorListener (_http_client.js:469:9)
    at TLSSocket.emit (events.js:315:20)
    at emitErrorNT (internal/streams/destroy.js:106:8)
    at emitErrorCloseNT (internal/streams/destroy.js:74:3)
    at processTicksAndRejections (internal/process/task_queues.js:80:21)
(Use 'node --trace-warnings ...' to show where the warning was created)
(node:11732) UnhandledPromiseRejectionWarning: Unhandled promise rejection. This error originated either by throwing insi
de of an async function without a catch block, or by rejecting a promise which was not handled with .catch(). To termin
ate the node process on unhandled promise rejection, use the CLI flag '--unhandled-rejections=strict' (see https://nodej
s.org/api/cli.html#cli_unhandled_rejections_mode). (rejection id: 1)
(node:11732) [DEP0018] DeprecationWarning: Unhandled promise rejections are deprecated. In the future, promise rejection
s that are not handled will terminate the Node.js process with a non-zero exit code.
```



Desarrollo Plataforma IoT Node-RED

edit s/ in node > Edit s/ endpoint node

Delete Cancel Update

Properties

Connection Variables

Transport: Ethernet (ISO-on-TCP)

Address: 10.10.10.10 Port: 102

Mode: Rack/Slot

Rack: 0 Slot: 1

Cycle time: 10 ms

Timeout: 1500 ms

Name: IOT_plc_proyecto

Area addressed is unknown or invalid

Delete Cancel Update

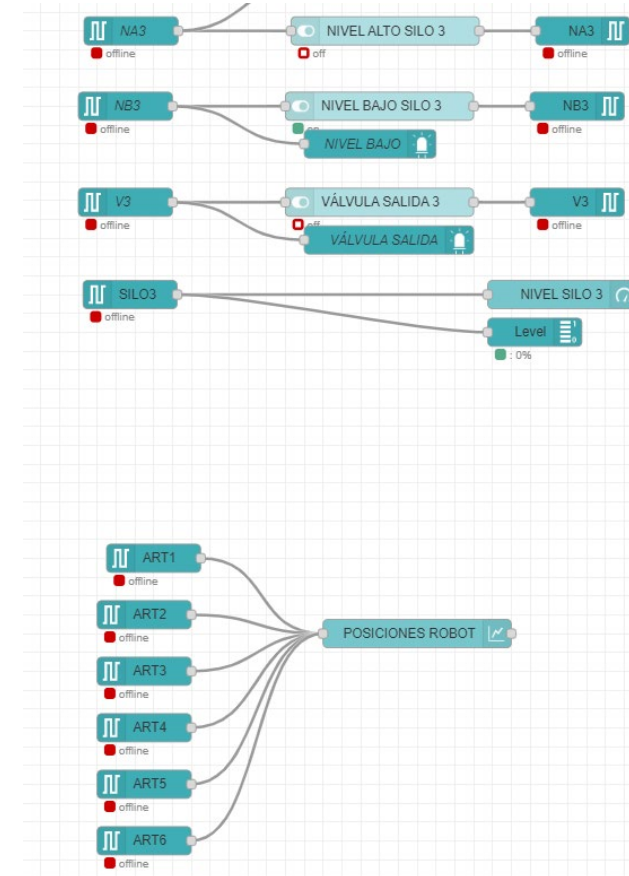
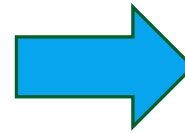
Properties

Variable list

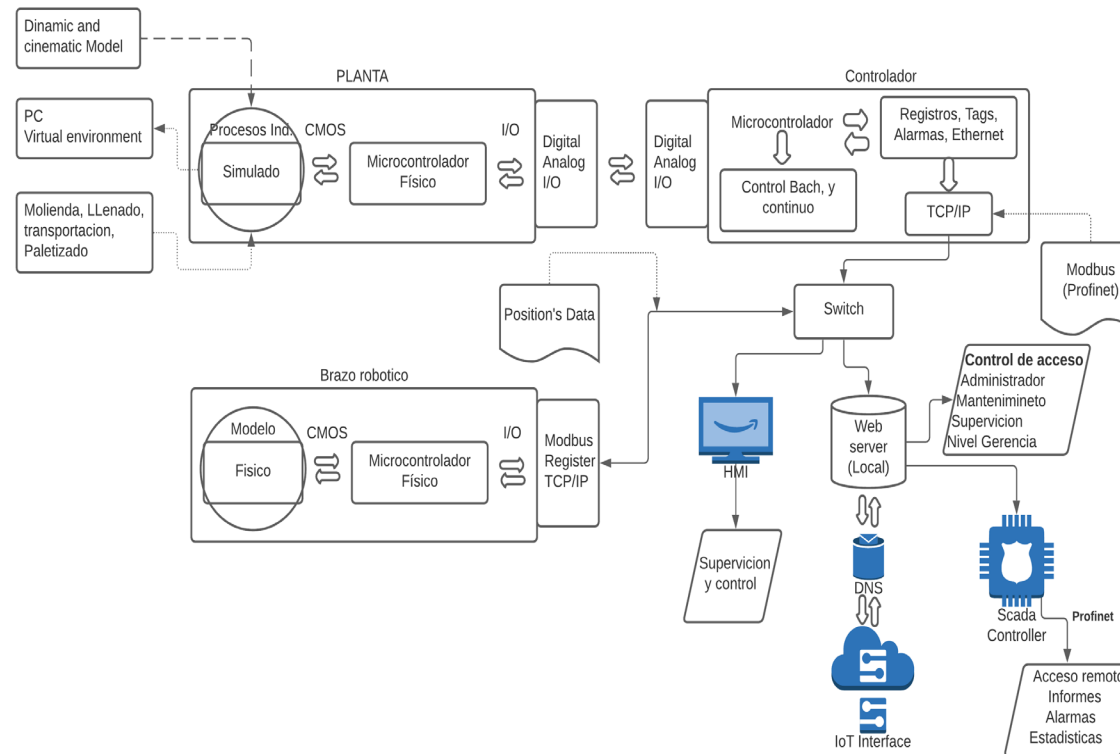
M0.2	NA1	x
M0.0	NB1	x
M0.1	NM1	x
M0.4	V1	x
M1.3	V2	x
M2.2	V3	x

+ Add @ Remove all

Area addressed is unknown or invalid



Esquema de comunicación



Pruebas y análisis

Carga para la placa PCB

Cargas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Banda	0.2 A	0.35 A	0.95 A	1.06 A	1.65 A
M1	0.01A	0.03 A	0.4 A	0.3 A	0.39 A
M2	0.02 A	0.02 A	0.35 A	0.24 A	0.35 A
M3	0.01 A	0.03 A	0.2 A	0.6 A	0.53 A
M4	0.01 A	0.02 A	0.1 A	0.4 A	0.41 A
M5	0.01 A	0.01 A	0.2 A	0.31 A	0.38 A
M6	0.03 A	0.02 A	0.27 A	0.37 A	0.5 A
M7	0.04 A	0.02 A	0.19 A	0.35 A	0.45 A
M8	0.01 A	0.03 A	0.28 A	0.3 A	0.49 A

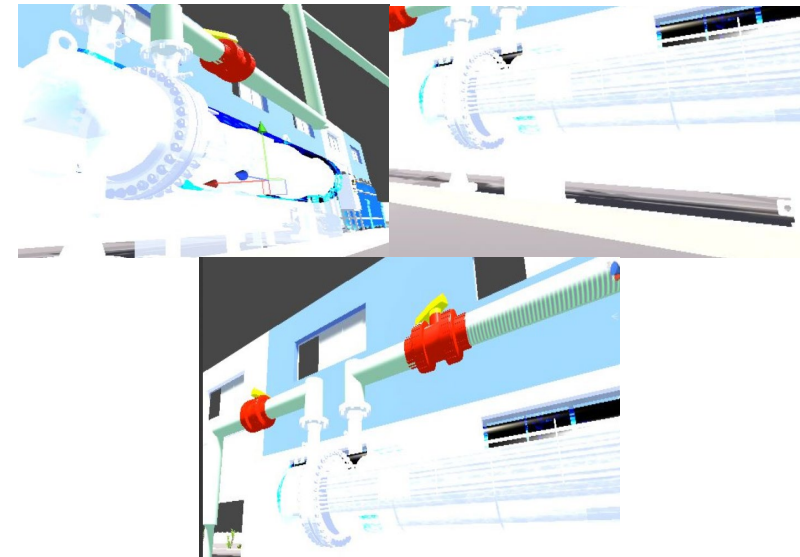
Carga en motores



Pruebas y análisis

Tiempo de Molienda

Molienda en funcionamiento



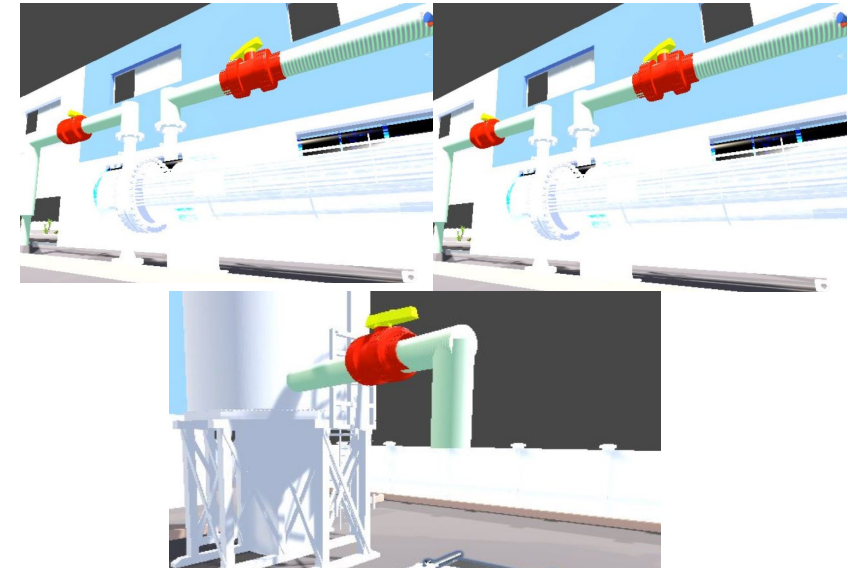
Activación Molino	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Nivel silo Alto	25.2 s	27.01 s	25.45 s	26.05 s
Nivel silo 25% menor al nivel alto	20.6 s	19.08 s	19.83 s	20.45 s
Nivel silo medio	17.3 s	17.04 s		16.99 s
Nivel silo bajo	5.03 s	5.09 s		4.95 s

Pruebas y análisis

Tiempo de apertura y cierre de válvulas

Apertura y cierre de válvulas

Válvulas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
V1	4.91 s	4.35 s	5.1 s	4.3 s	4.9 s
V2	4.7 s	4.5 s	4.9 s	4.62 s	4.99 s
V3	5.03 s	4.97 s	5 s	4.95 s	5.01 s

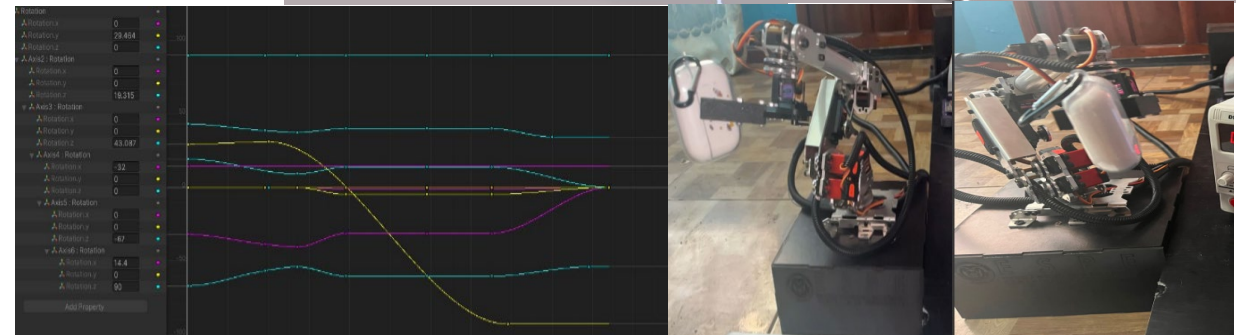
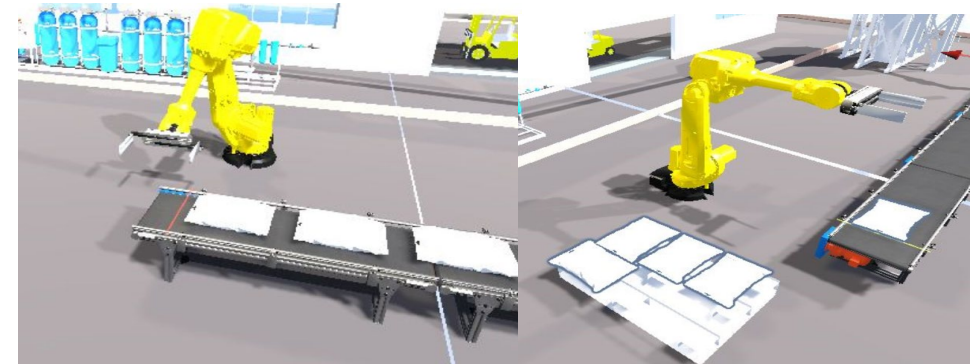


Pruebas y análisis

Tiempo de paletizado físico vs simulado

Paletizado	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Simulado	6.5 s	6.9 s	6.4 s	6.7 s	6.57 s	6.8 s
Físico	6.8 s	7.3 s	6.9 s	7.1 s	7 s	7.21 s

Pruebas de paletizado



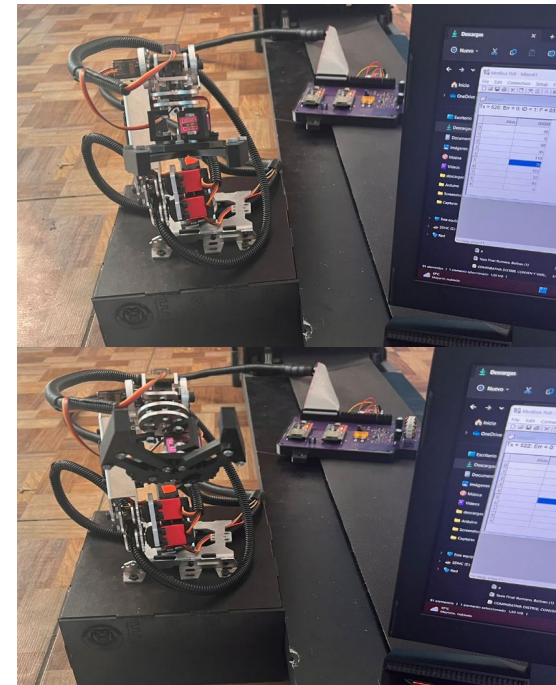
Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Primera articulación.

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	25	0.2 s
2	35	0.4 s
Pruebas	Grados	Tiempo
3	40	0.42 s
4	42	0.42 s
5	43	0.42 s
6	35	0.41 s
7	42	0.45 s
8	43	0.45 s

Movimiento 1ra articulación



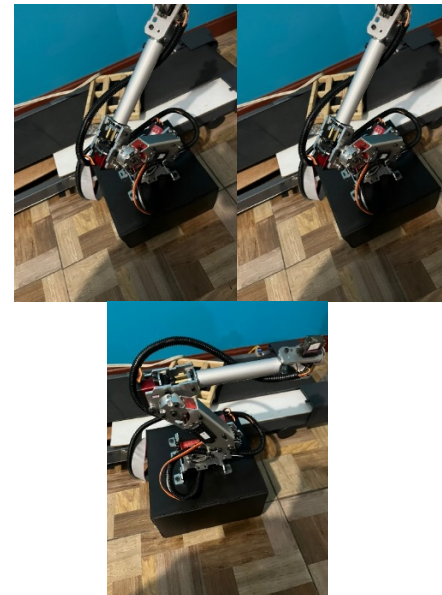
Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Segunda articulación.

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	39	0.32s
2	38	0.32 s
3	40	0.35 s
4	41	0.4 s
5	42	0.41 s
6	43	0.4 s
7	43	0.4 s
8	43	0.4 s

Movimiento 2da articulación



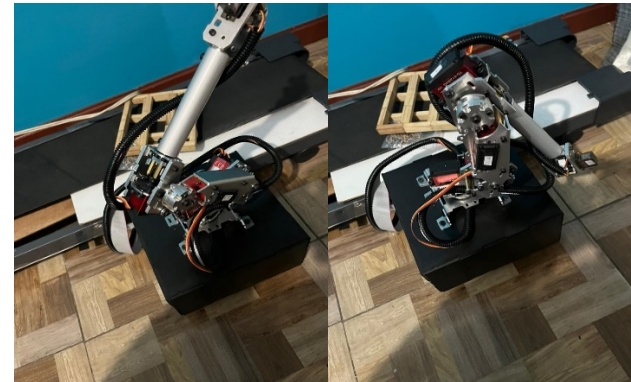
Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Tercer articulación.

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	41	0.5 s
2	42	0.43 s
3	41	0.45 s
4	43	0.4 s
5	42	0.4 s
6	43	0.44 s
7	44	0.46 s
8	44	0.46 s

Movimiento 3ra articulación



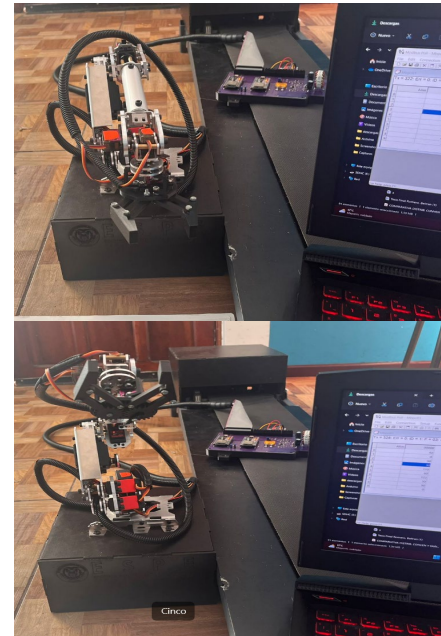
Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Cuarta articulación.

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	42	0.4 s
2	44	0.41 s
3	43	0.39 s
4	44	0.43 s
5	43	0.5 s
6	44	0.4 s
7	45	0.4 s
8	45	0.4 s

Movimiento 4ta articulación



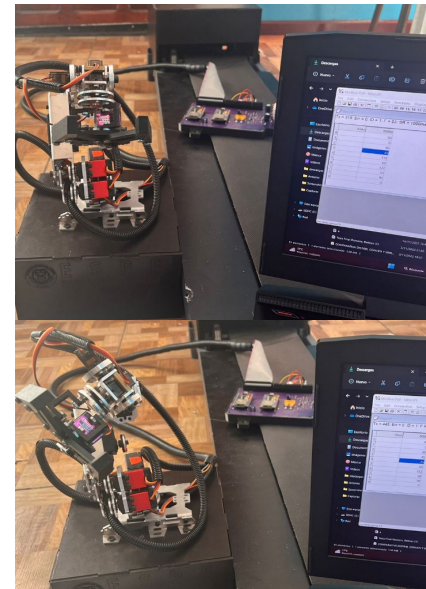
Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Quinta articulación.

Pruebas	Grados	Tiempo
1	44	0.4 s
2	43	0.43 s
3	45	0.4 s
4	44	0.41 s
5	45	0.43 s
6	44	0.41 s
7	43	0.41 s
8	45	0.4 s

Movimiento 5ta articulación



Pruebas y análisis

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Sexta articulación.

Pruebas	Grados	Tiempo
1	44	0.3 s
2	44	0.38 s
3	45	0.39 s
4	45	0.4 s
5	43	0.42 s
6	44	0.4 s
7	45	0.4 s
8	47	0.4 s

Movimiento 6ta articulación





Pruebas y análisis

Pruebas de comunicación entre Unity 3D y PLC S71200 AC/DC/RLY



```
C:\Users\jordis>ping 10.10.10.1

Microsoft Windows [Version 10.0.22621.1265]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\jordis>ping -t 10.10.10.10

Pinging 10.10.10.1 with 32 bytes of data:
Reply from 10.10.10.1: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 10.10.10.1: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 10.10.10.1: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 10.10.10.1: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 10.10.10.1: bytes=32 time<1ms TTL=64

Ping statistics for 10.10.10.1:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 1ms, Average = 0ms

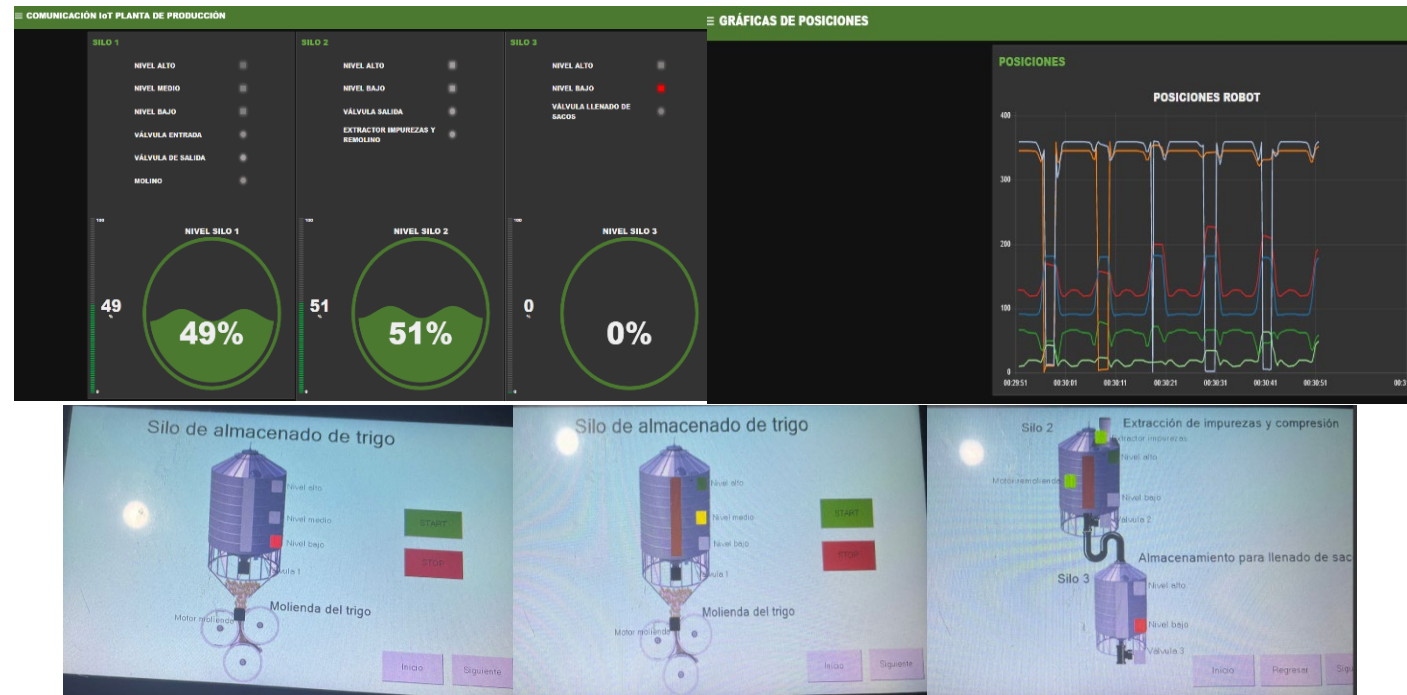
Pinging 10.10.10.10 with 32 bytes of data:
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30
Reply from 10.10.10.10: bytes=32 time=1ms TTL=30

Ping statistics for 10.10.10.10:
    Packets: Sent = 14, Received = 14, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 1ms, Average = 0ms
```




Pruebas y análisis

Pruebas de funcionamiento comunicación IoT y HMI





- La técnica hardware in the loop es una herramienta sumamente útil para la identificación de métodos de control, así como el hardware adecuado para control una planta de determinada frecuencia, para este caso práctico en particular, se propuso utilizar un microcontrolador ESP32-WROOM32D, para el control único del brazo robótico
- Los modelos matemáticos que rigen el comportamiento de las distintas etapas de este proceso industrial, por lo general son lineales y secuenciales, la única diferencia del brazo robótico, que es un sistema complejo determinado como MIMO, la misma que rige su comportamiento en función de las características físicas de su modelo considerado en la etapa de diseño
- Los algoritmos de control para el proceso secuencial de las etapas tales como, molienda, purificación, llenado, transportación, son secuenciales, por lo que no se necesita un controlador de altas frecuencias, sin embargo, se requiere almacenar información de registros y alarmas para presentación de datos a nivel SCADA. Por este motivo se opta el uso de un PLC, a fin de almacenar información, y realizar una comunicación efectiva bajo protocolo Modbus TCP/IP



Pruebas y análisis

Recomendaciones

- Usar Cinemática inversa con los parámetros DH para generar los puntos de trayectoria y programar el microcontrolador, es una forma sencilla y eficaz, de modo que se obtiene los ángulos de giro para llegar a la posición deseada.
- El controlador del del brazo robotito, debe ser dedicado, y no se debe usar con propósito de controlar otra subrutina dentro de su programación, para evitar la falta de fluidez en sus trayectorias, que para este proyecto, se cambia los datos del DB del robot, mediante interrupciones, para garantizar el control continuo del proceso.



GRACIAS