



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

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

**“DESARROLLO DE APLICACIONES DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE POSICIÓN DE UN ACTUADOR NEUMÁTICO
CON VÁLVULA PROPORCIONAL”**

AUTORES:

Vega Tinitana, Angel Damian

Villacís León, Nicolás Edison

DIRECTOR:

Ing. Terneus Páez, Carlos Francisco

2023

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





CONTENIDO

- Introducción
- Investigación Bibliográfica
- Metodología
- Diseño y Construcción
- Pruebas y Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Trabajos Futuros



Justificación e importancia

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

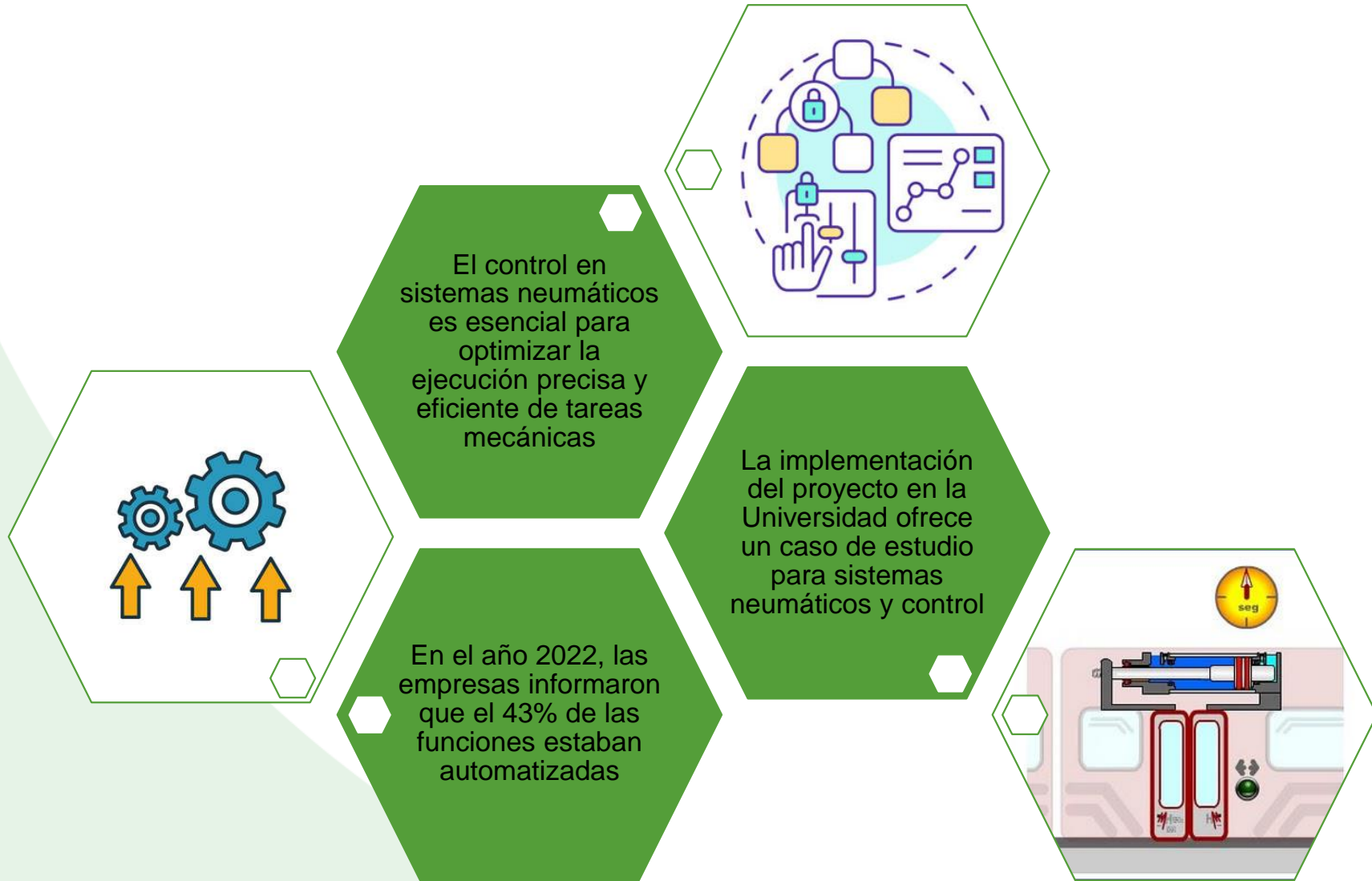
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Descripción del Proyecto

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

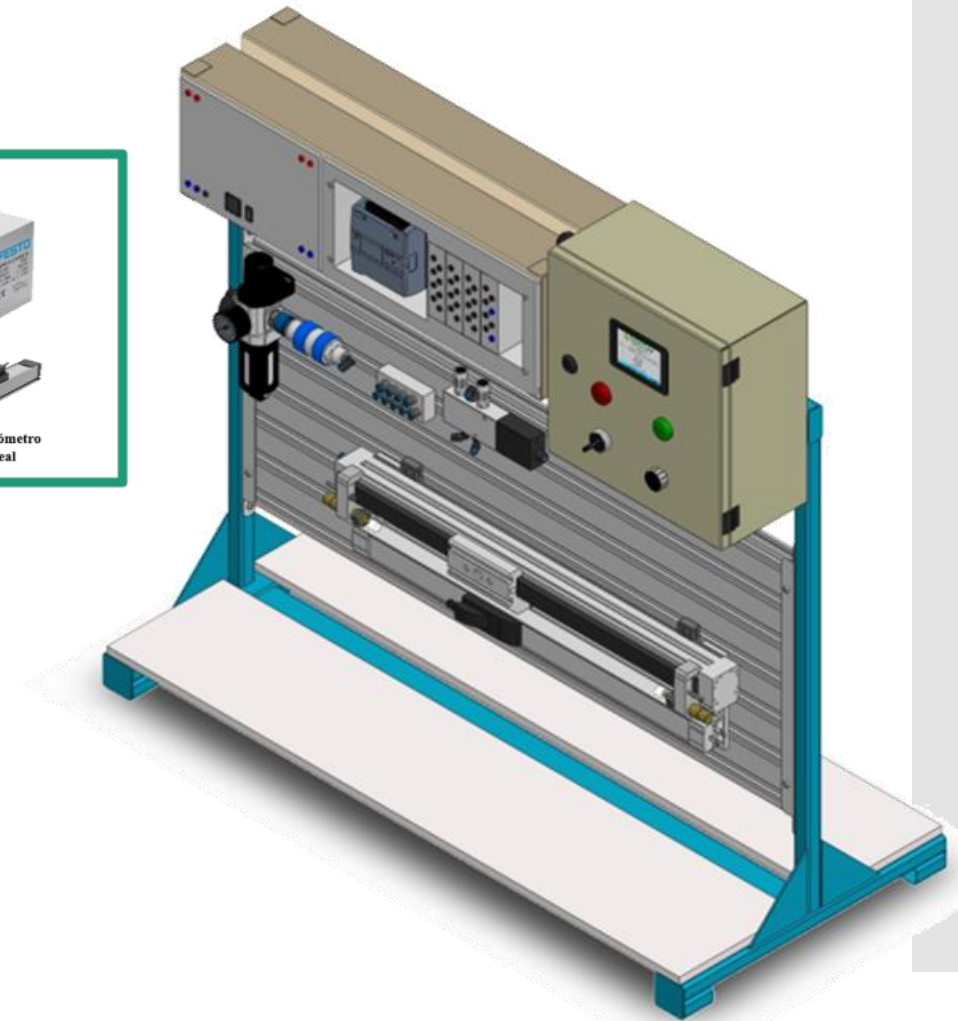
Trabajos futuros



Comunicación
Inalámbrica



Cableado
duro





Objetivos

GENERAL

- Implementar un sistema de control de posición de un actuador lineal neumático con válvula proporcional aplicando tecnología PLC empleando los equipos del laboratorio de Neumática e Hidráulica.

ESPECÍFICOS

- Controlar la posición de un actuador lineal neumático con PLC y una función PID con el fin de obtener las respuestas más adecuadas para el sistema.
- Diseñar e implementar la estructura de una estación en la cual se montarán todos los elementos que constituyen el sistema de control de posición de un actuador lineal para su uso en el laboratorio.
- Implementar una interfaz HMI para visualización del proceso de control de posición de un actuador lineal neumático y la configuración de los parámetros del equipo.

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

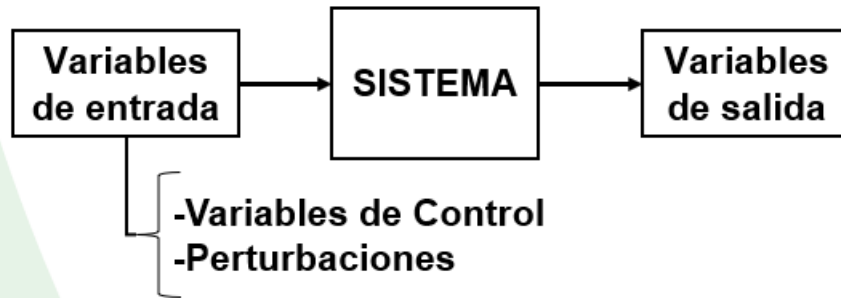
Recomendaciones

Trabajos futuros

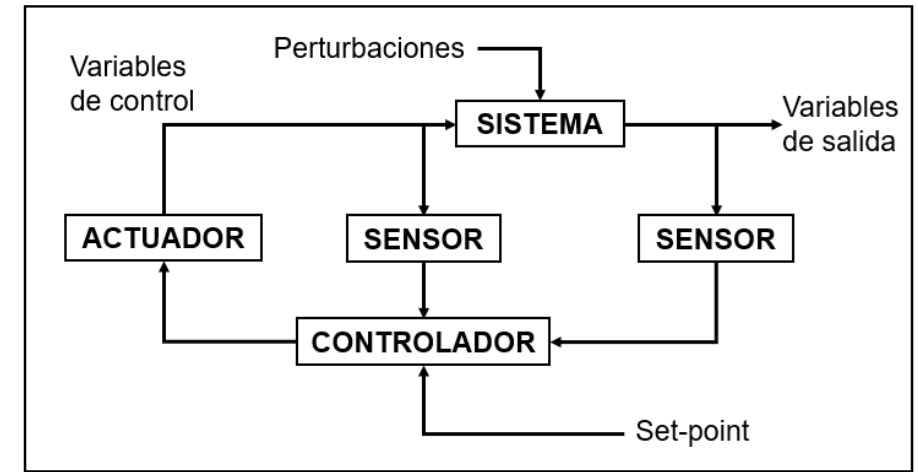


Sistemas de Control

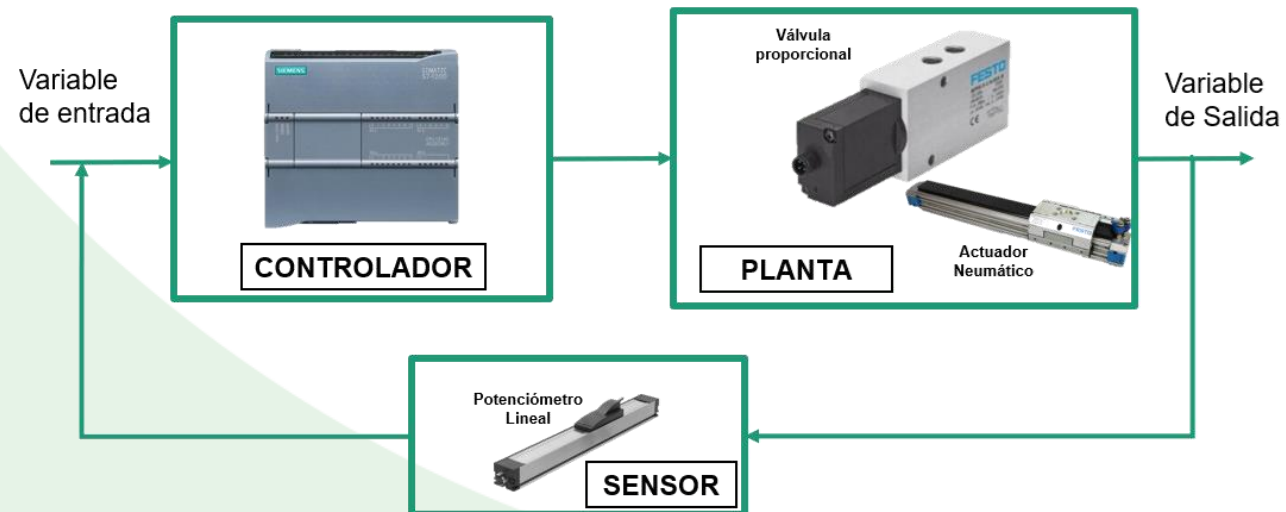
- Sistema de control



- Elementos de un sistema de Control



- Sistema de control del proyecto



Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

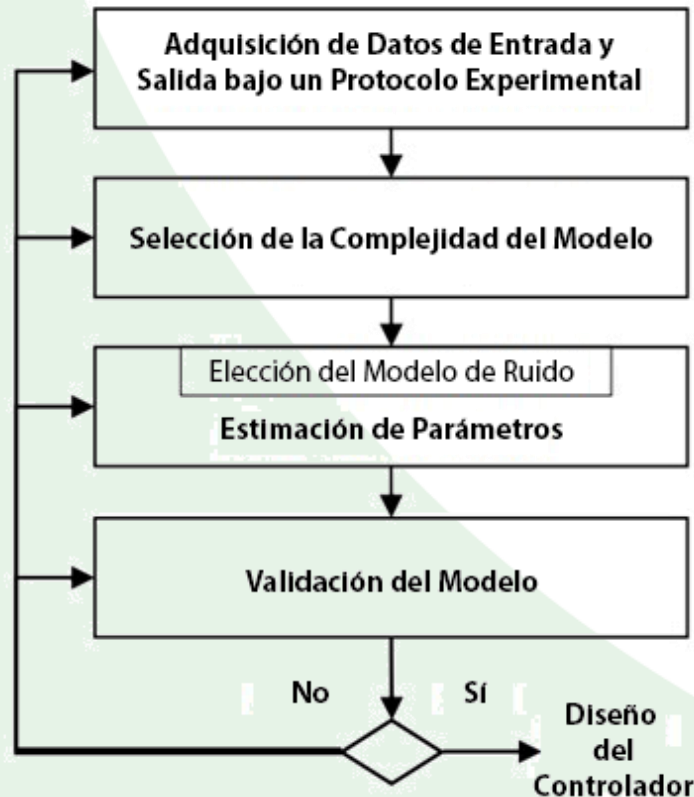


Identificación de Sistemas

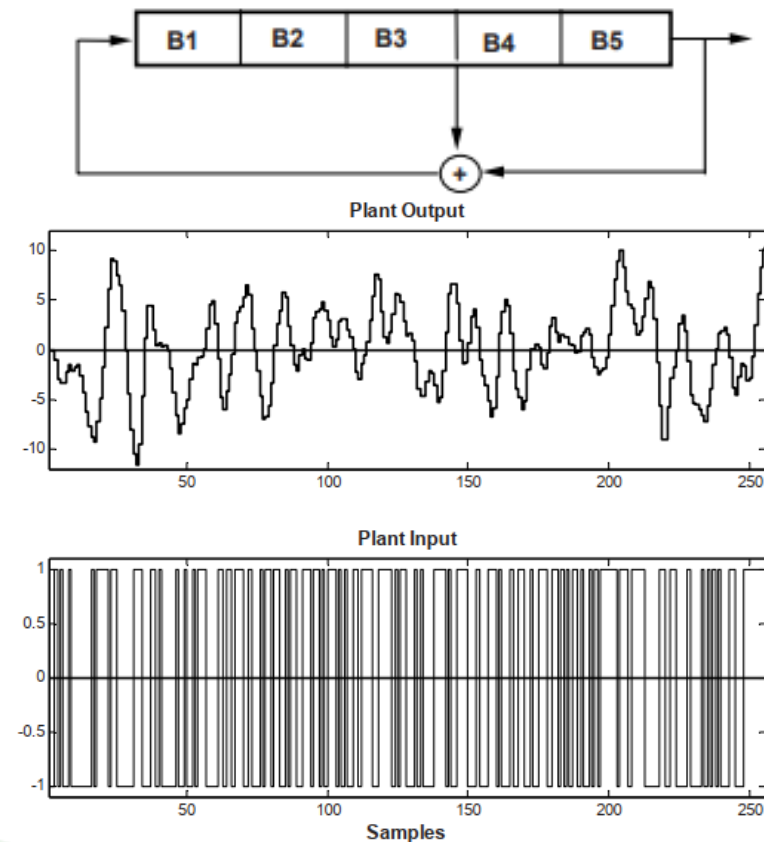
- Tipos de identificación



- Metodología de identificación



- Señal de entrada (PRBS)



Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

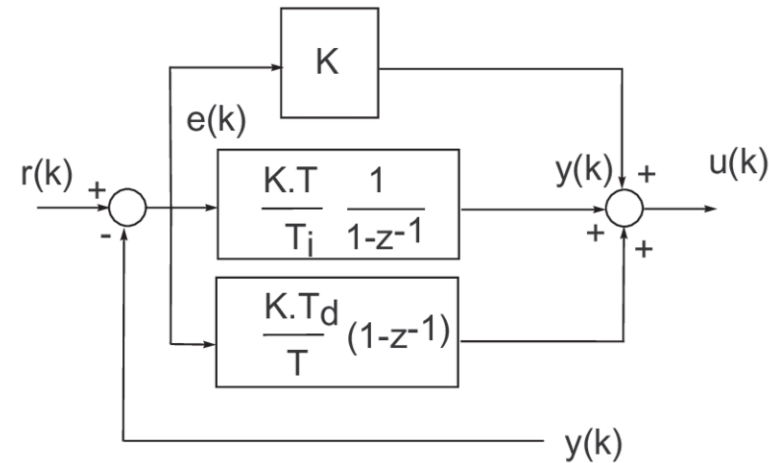
Recomendaciones

Trabajos futuros

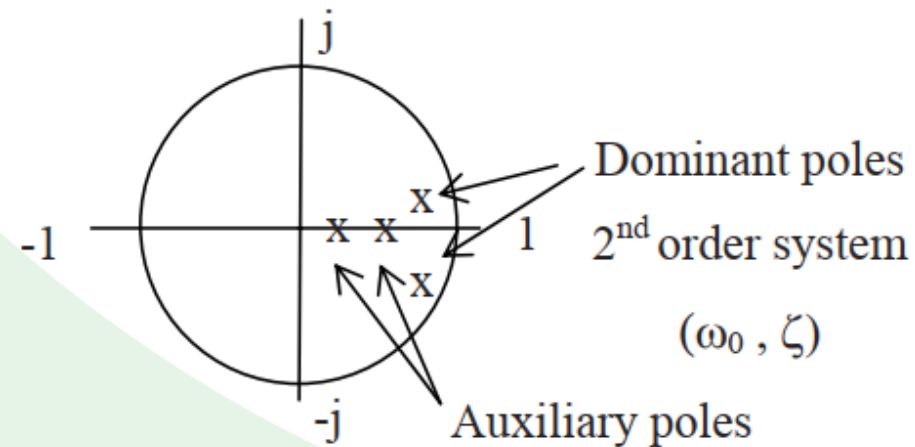


Técnicas de Sintonización

- Controlador PID discreto



- Sintonización por Ubicación de Polos



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

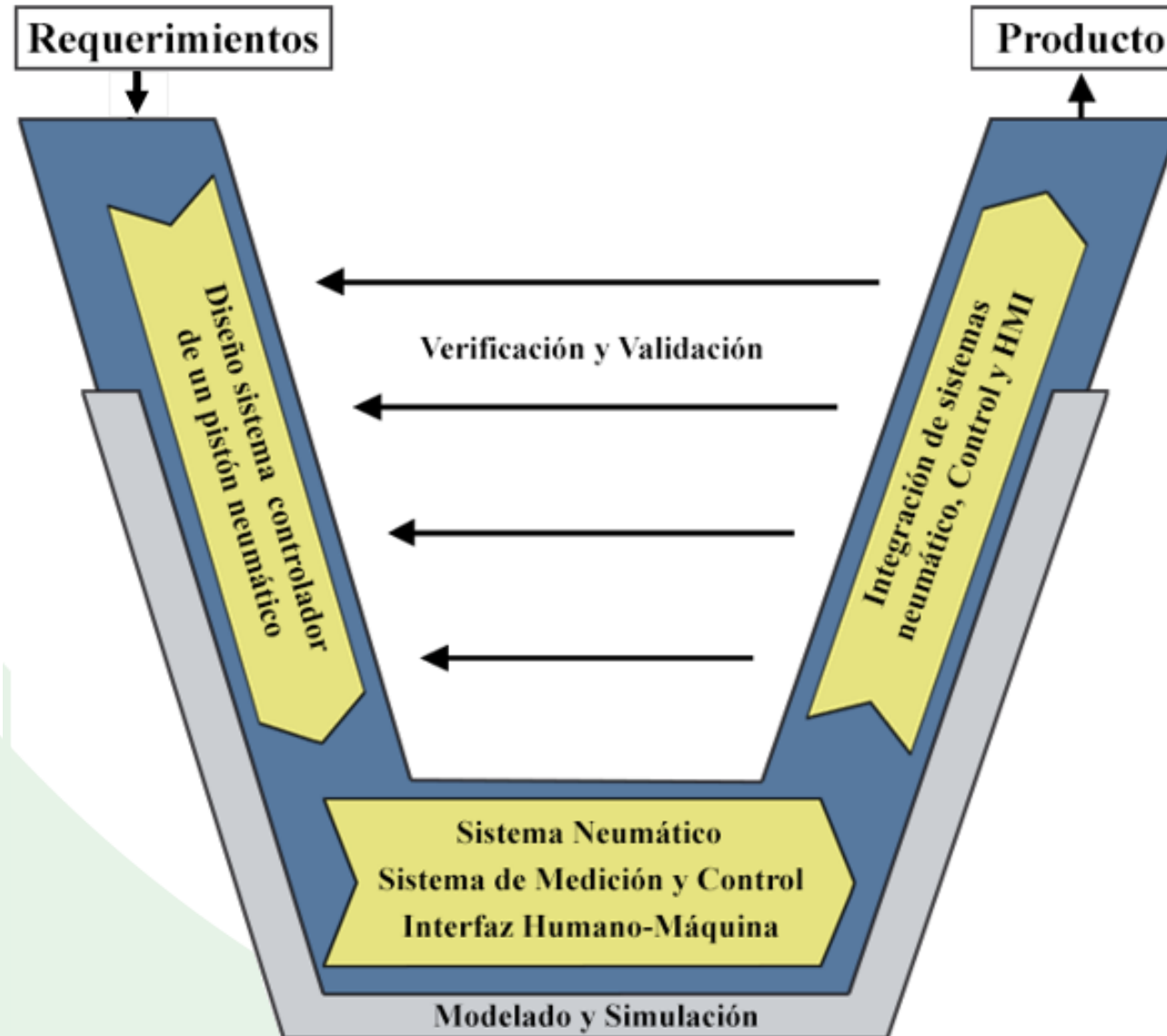
Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Metodología



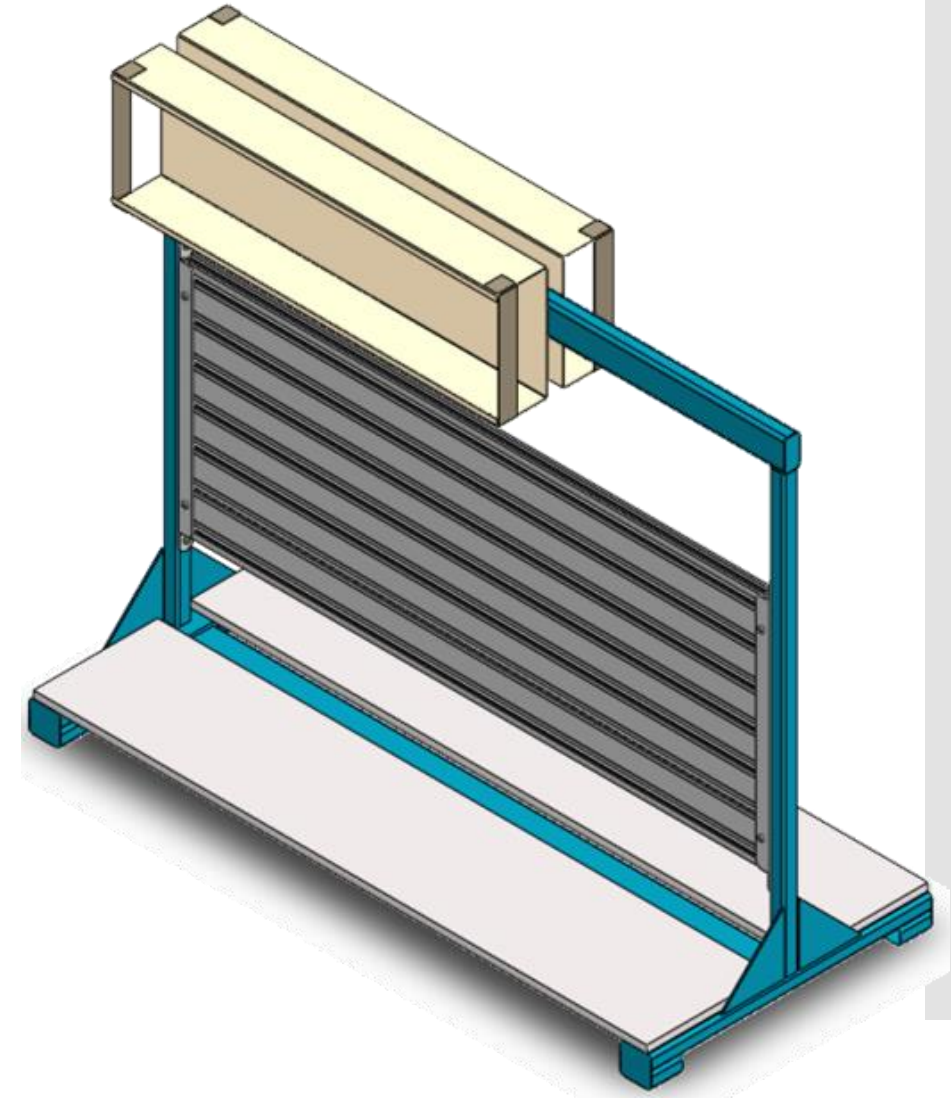
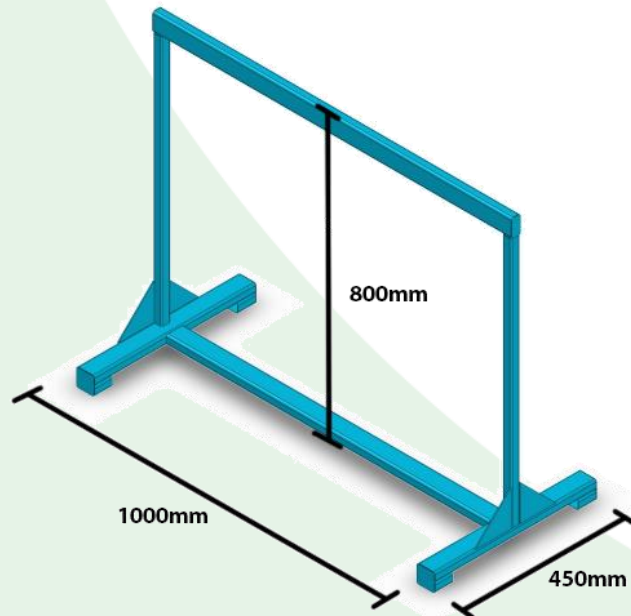


Diseño de Soporte

- **Diseño de soporte**

Se considera

- Sobre mesa de 750x1200mm
- Placa de aluminio ranurada
- Canaletas para insertar PLC y fuente de alimentación.
- Gabinete eléctrico
- Mesa para colocar objetos



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

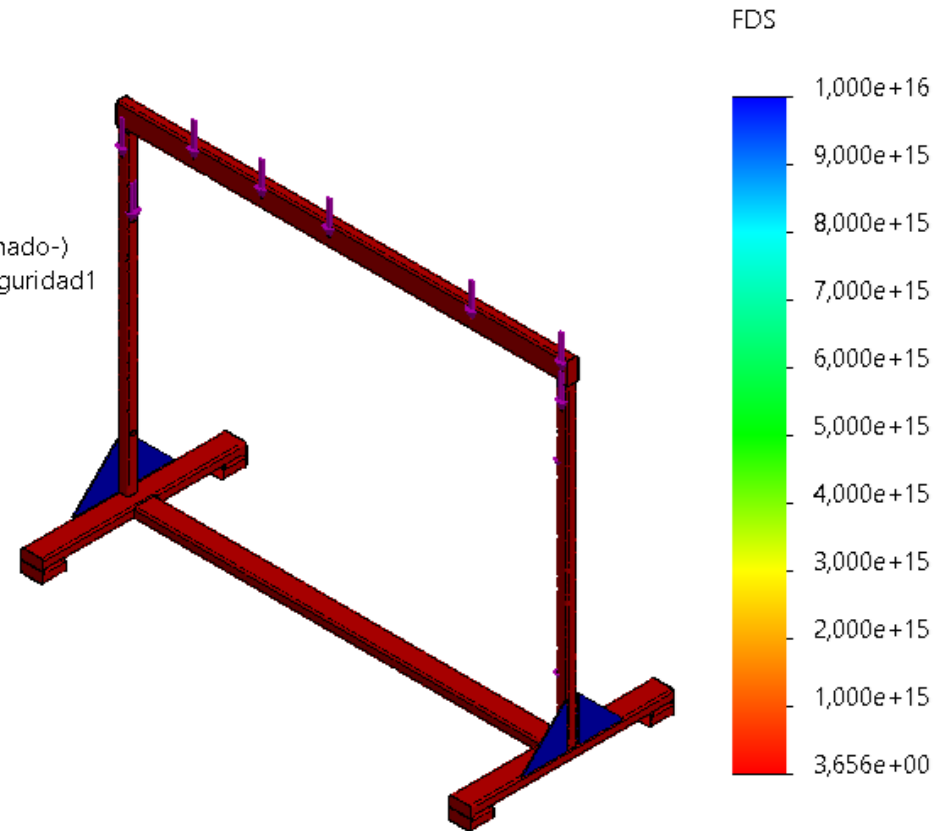
Trabajos futuros



Validación del soporte

- Factor de Seguridad de 3.7
- Desplazamiento máx. viga superior 0.2mm

Nombre del modelo: SCPN-Analysis
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 3,7



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

**Diseño y
Construcción**

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño de Tablero de Control

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Requerimientos

- Protección de elementos electrónicos.
- Centralizar el cableado de diferentes conexiones.
- Permita el montaje de la HMI y elementos de mando .
- Facilitar la conexión y desconexión de elementos propios del laboratorio.



Construcción de Tablero de Control

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

1. HMI
2. Luces piloto
3. Interruptor Stop-Run
4. Perilla valor set-point
5. Conectores banana hembra





Montaje de Sistema Neumático

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

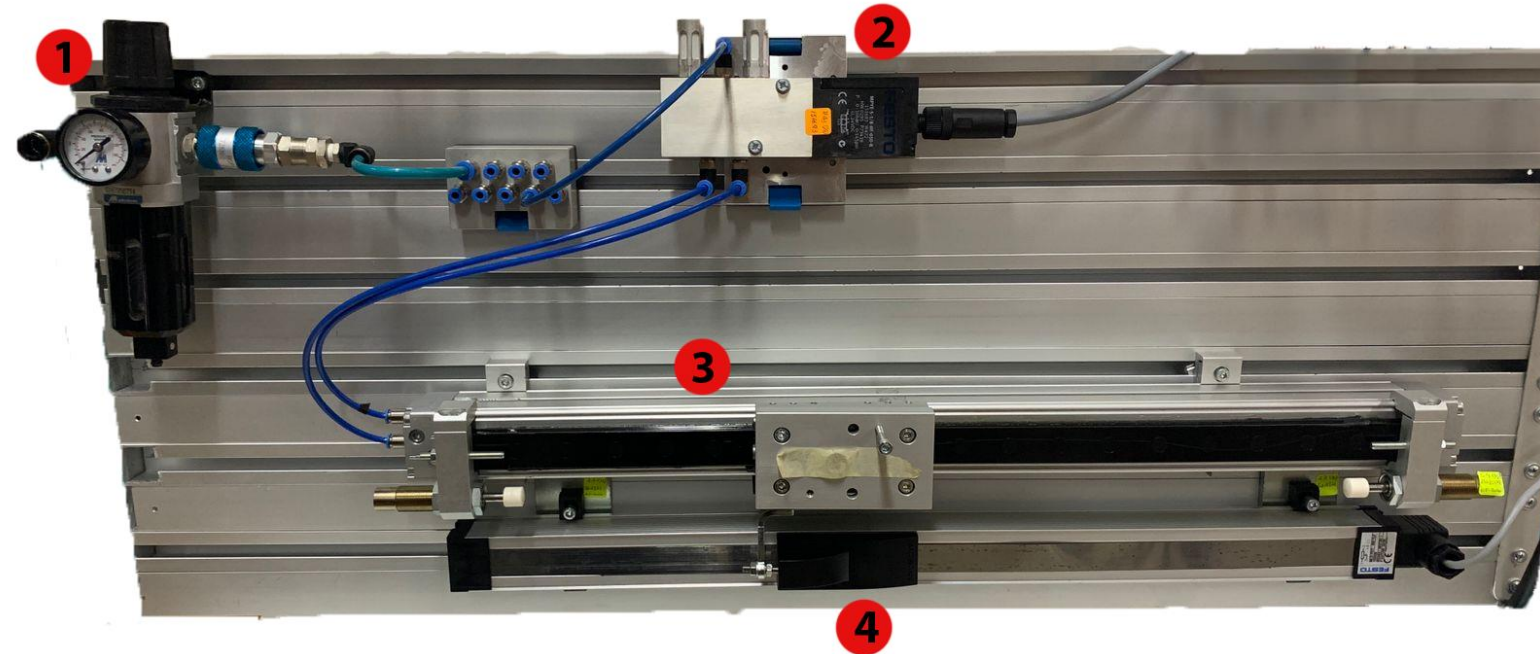
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

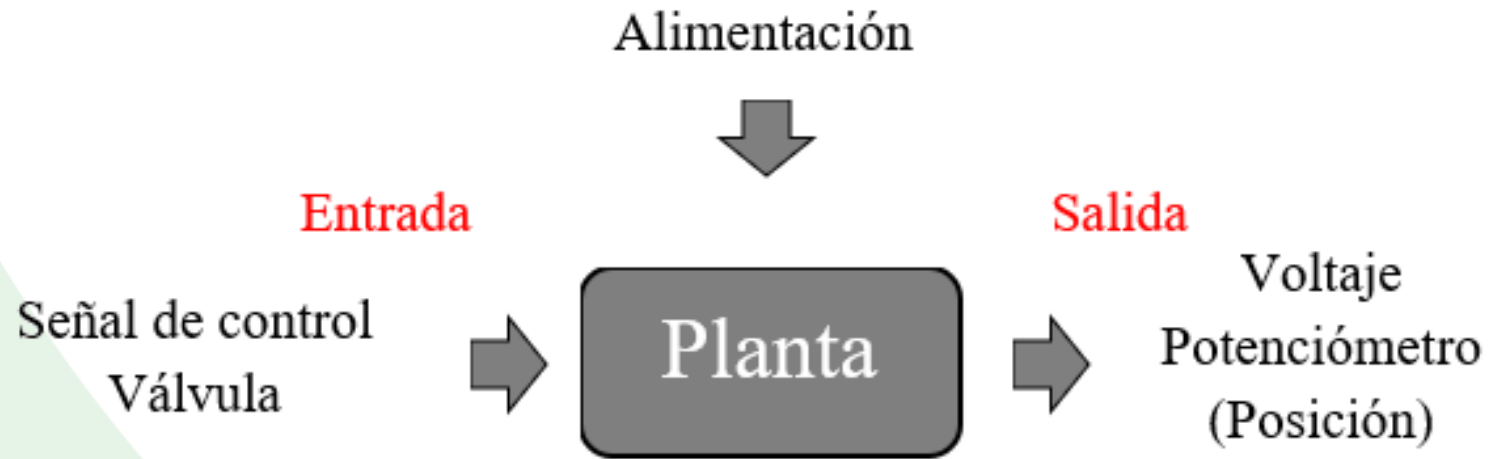


1. Unidad de mantenimiento
2. Válvula proporcional direccional MPYE-5-1/8-HF-010-B
3. Actuador lineal DGPL-20-450-PPV-KF
4. Potenciómetro lineal



Definición Planta

- Válvula proporcional direccional
- Actuador Neumático
- Potenciómetro lineal



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Reducción de la Banda Muerta

Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

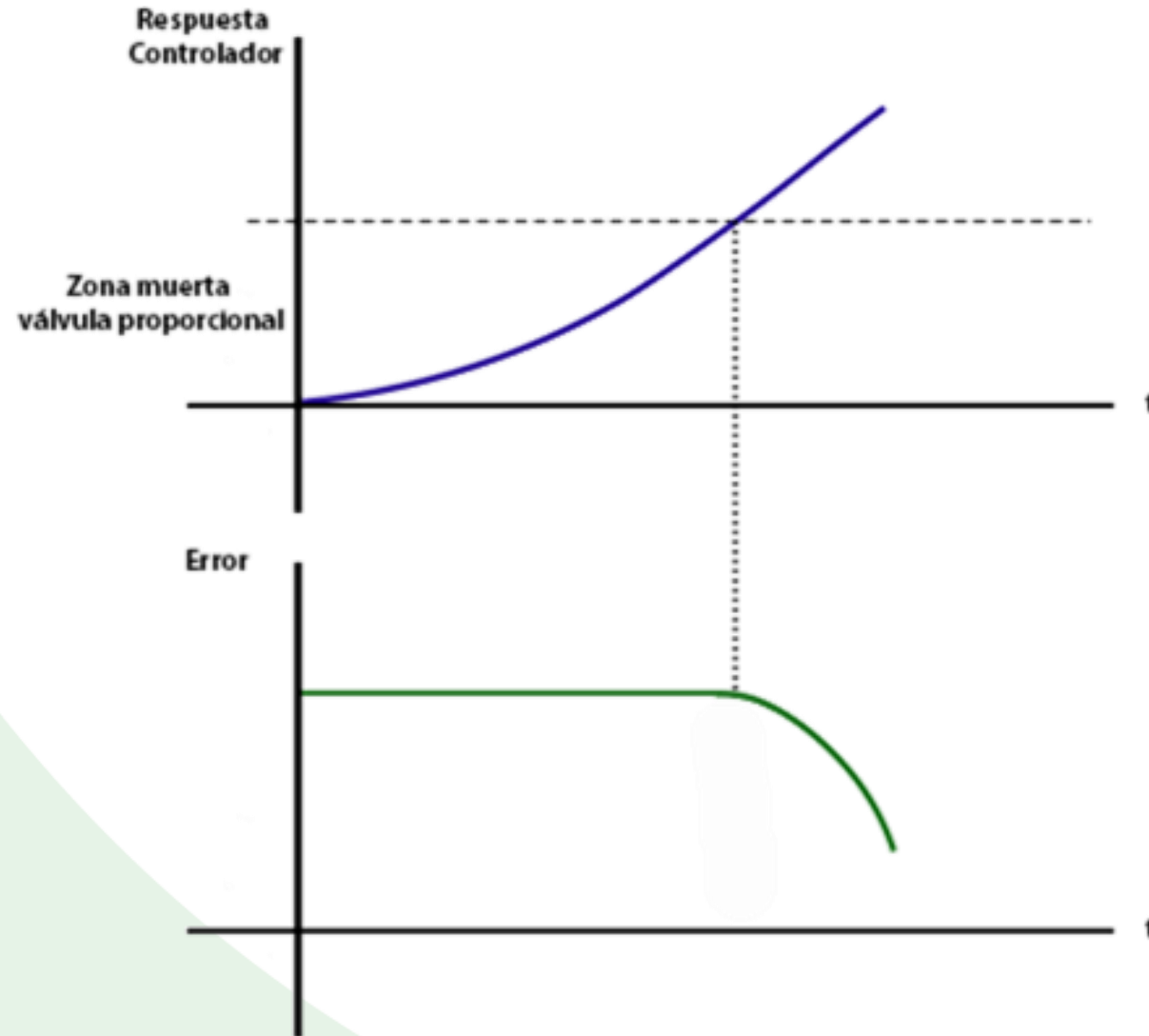
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

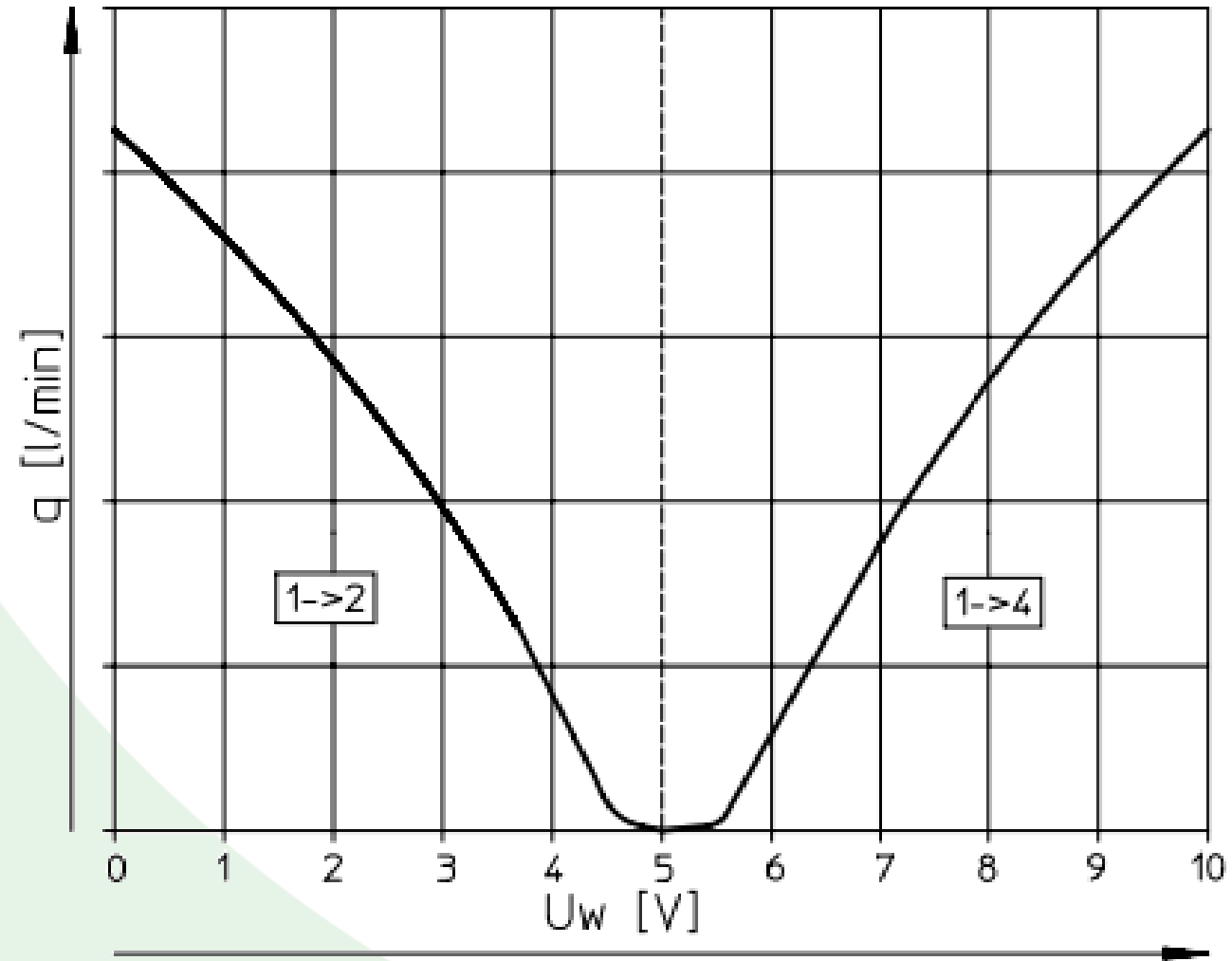
Trabajos futuros





Reducción de la Banda Muerta

Comportamiento válvula proporcional



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

**Diseño y
Construcción**

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

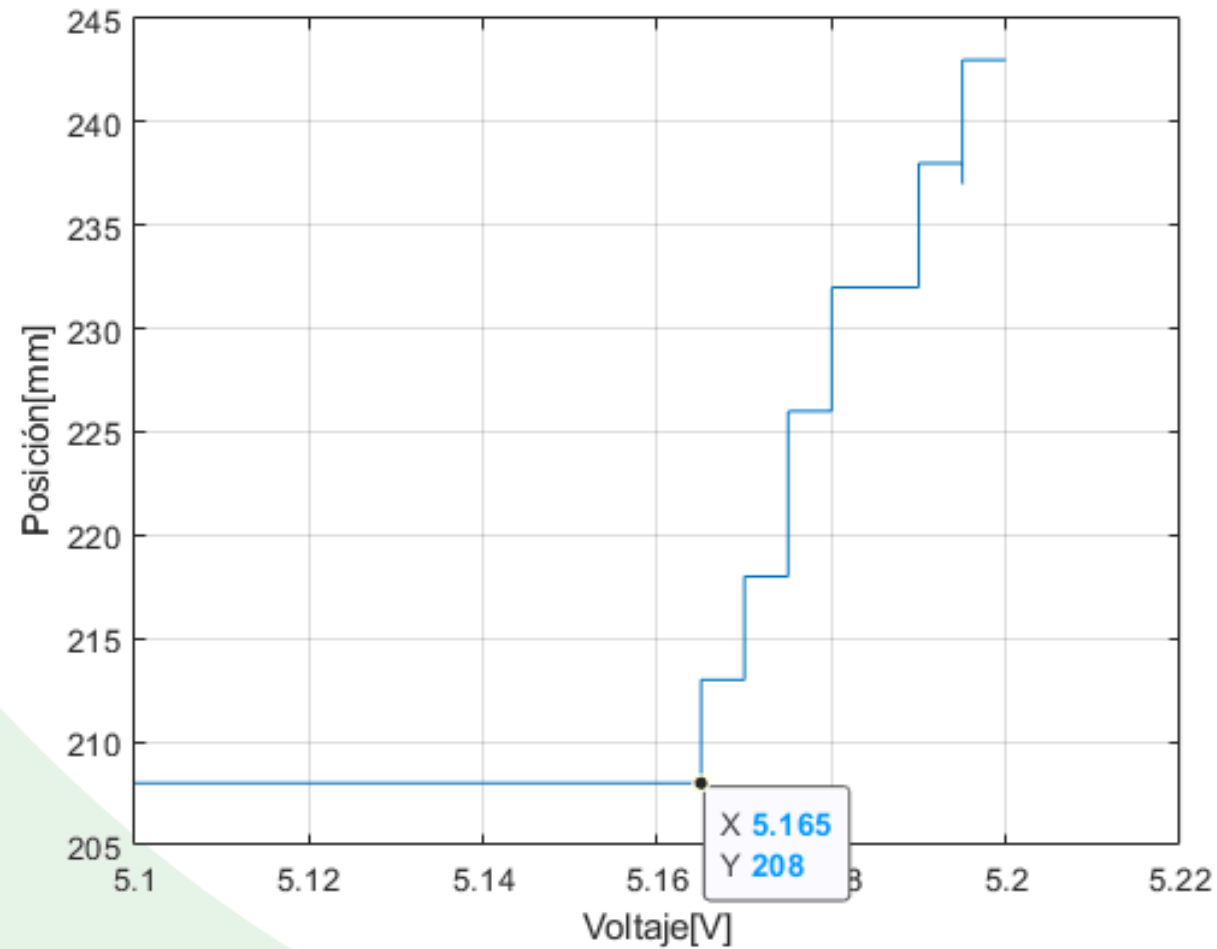
Recomendaciones

Trabajos futuros



Reducción de la Banda Muerta

- Prueba rampa positiva



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

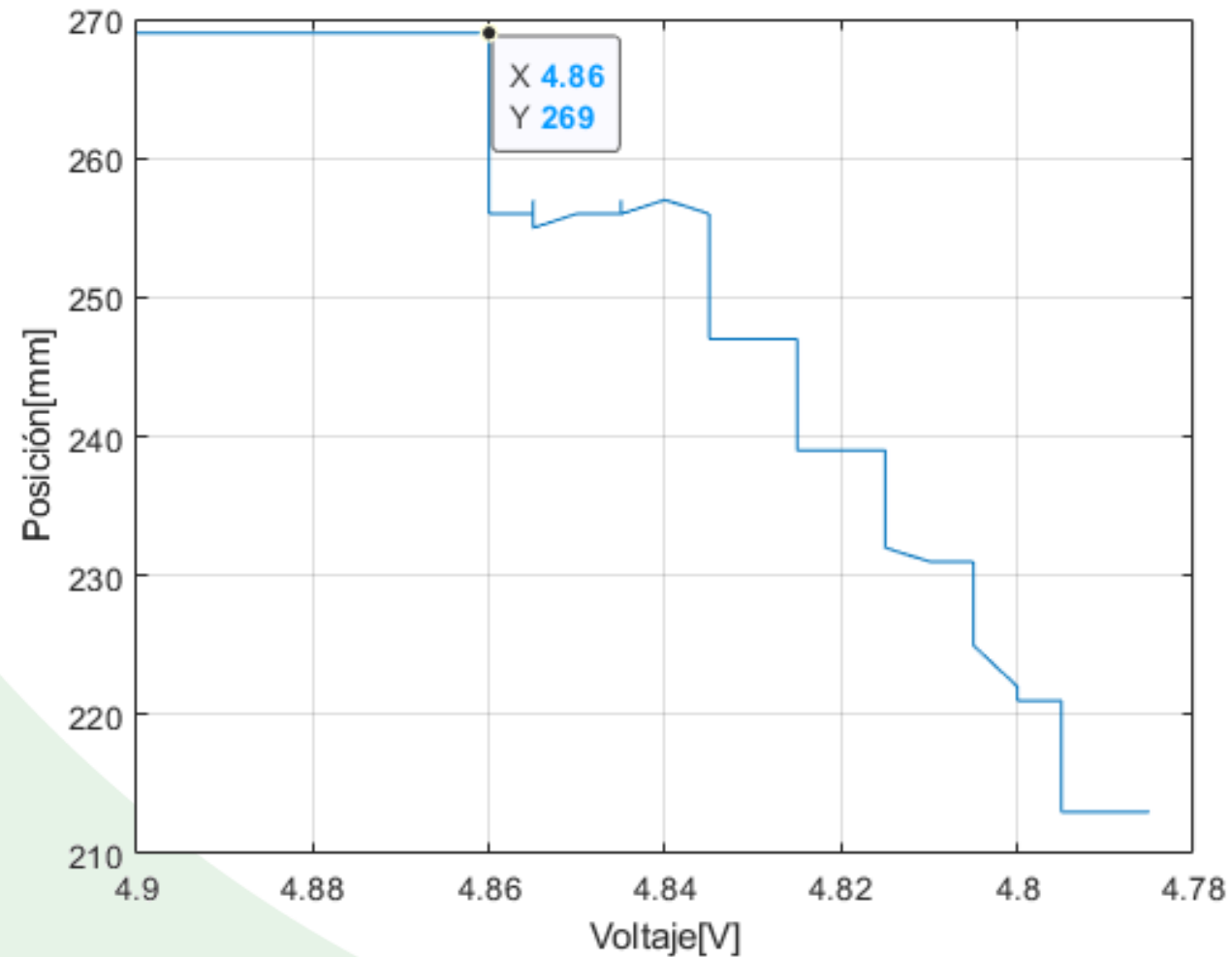
Recomendaciones

Trabajos futuros



Reducción de la Banda Muerta

- Prueba rampa negativa



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

**Diseño y
Construcción**

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Reducción de la Banda Muerta

- **Algoritmo de reducción**

El algoritmo que será implementado en la programación del PLC debe realizar las siguientes acciones:

- Si la señal a enviar a la válvula proporcional está en el rango de $[0.00:4.85]$ V debe ser escrita a la salida análoga sin cambio alguno.
- Si la señal a enviar a la válvula proporcional está en el rango de $(4.85:9.70]$ V esta debe ser sumada 0.3 V y ser escrita a la salida análoga.

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

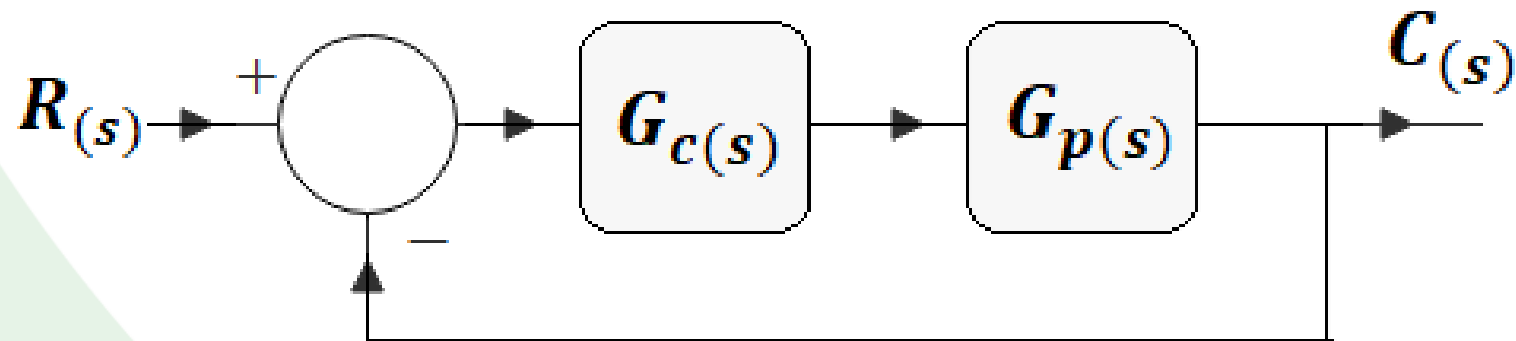
Recomendaciones

Trabajos futuros



Centrado en cero de la Planta

Debido a que la válvula proporcional solo admite valores positivos de 0.00 a 9.70V (Rango definido tras la reducción de la zona muerta), su centro se encuentra en 4.85V y, por lo tanto, no es correcto enviar directamente la respuesta del controlador a la variable relacionada a la válvula proporcional



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Identificación de la Planta

- Experimento con excitación de PRBS

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

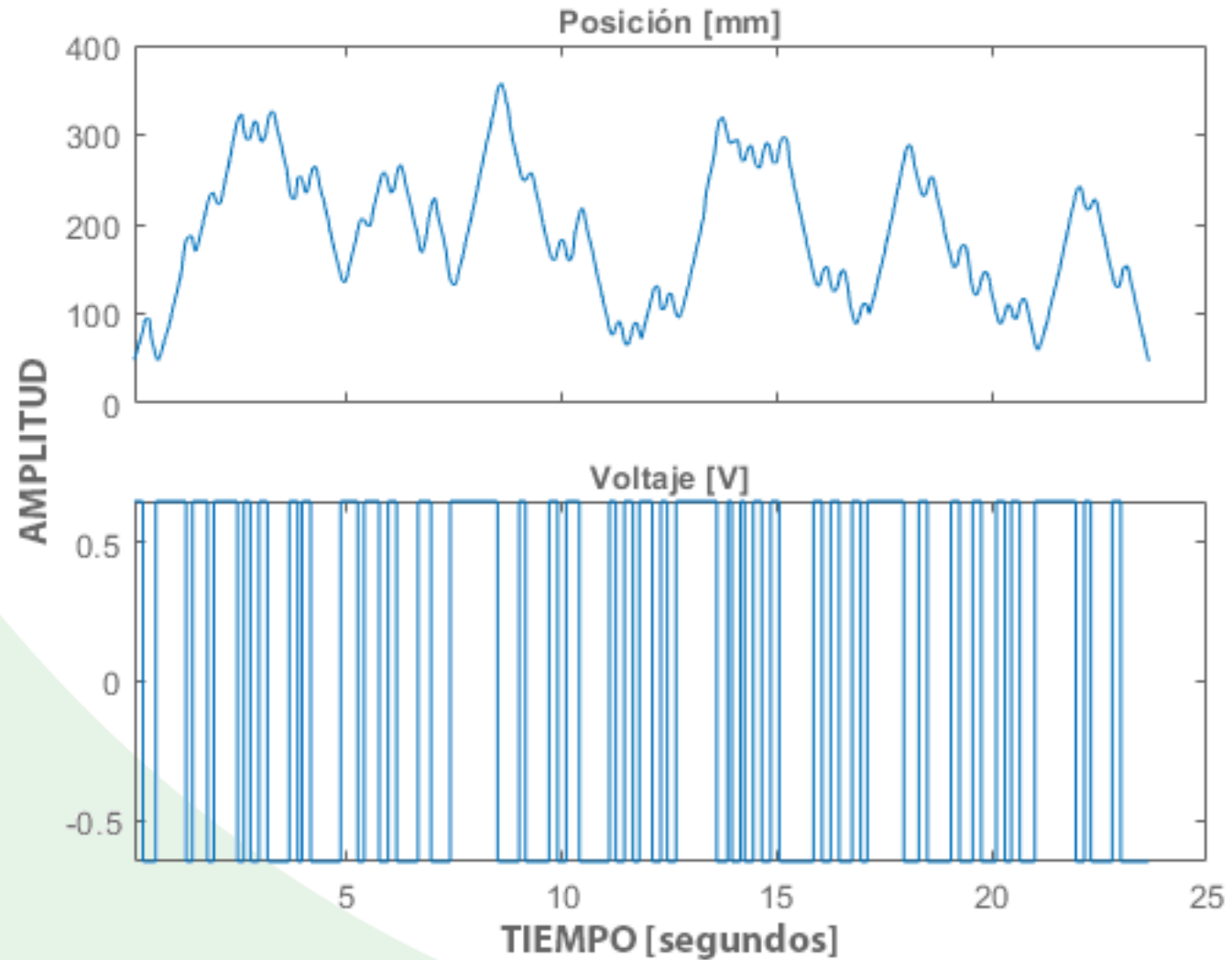
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Identificación de la Planta

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

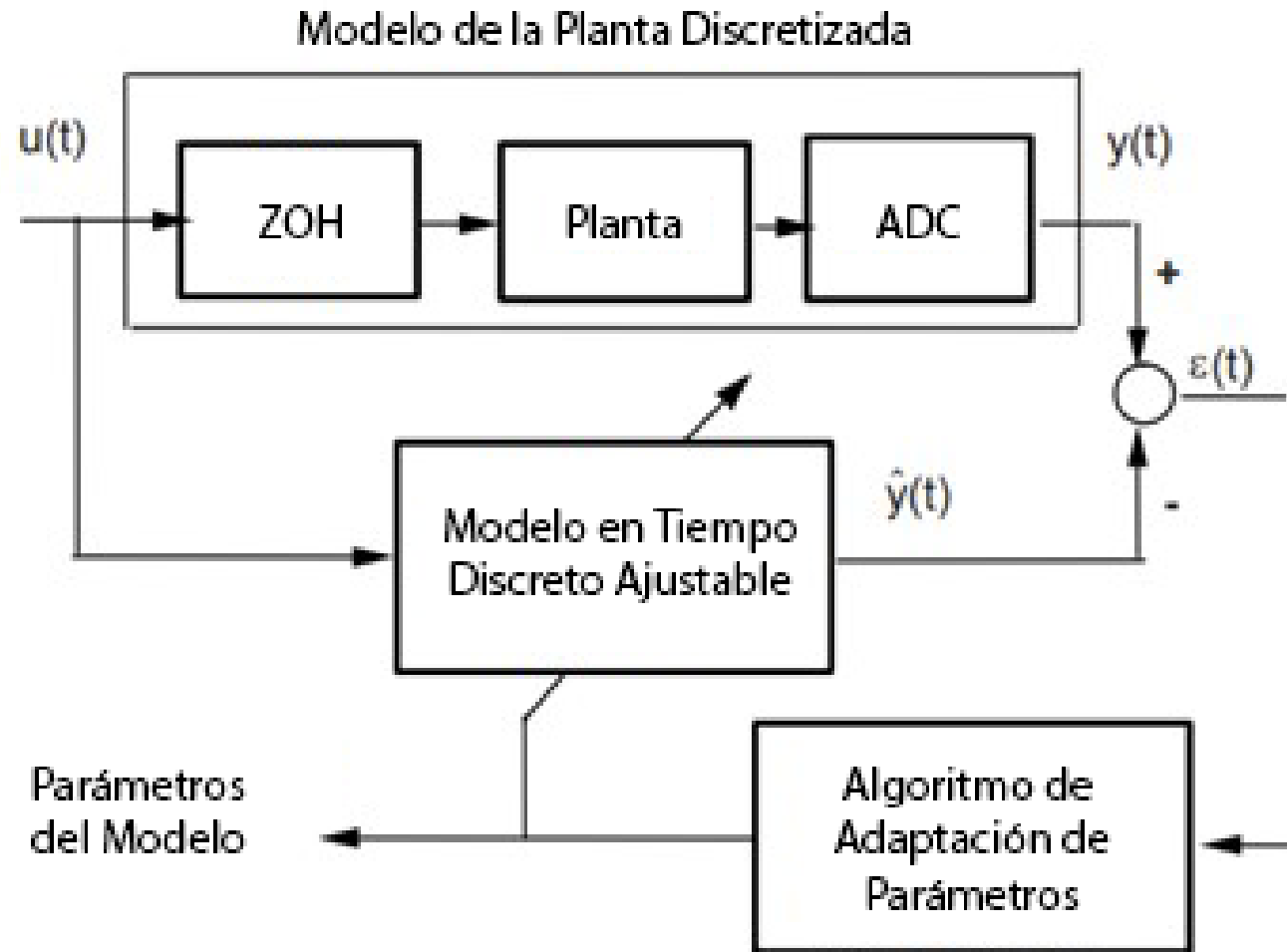
**Diseño y
Construcción**

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Identificación de la Planta

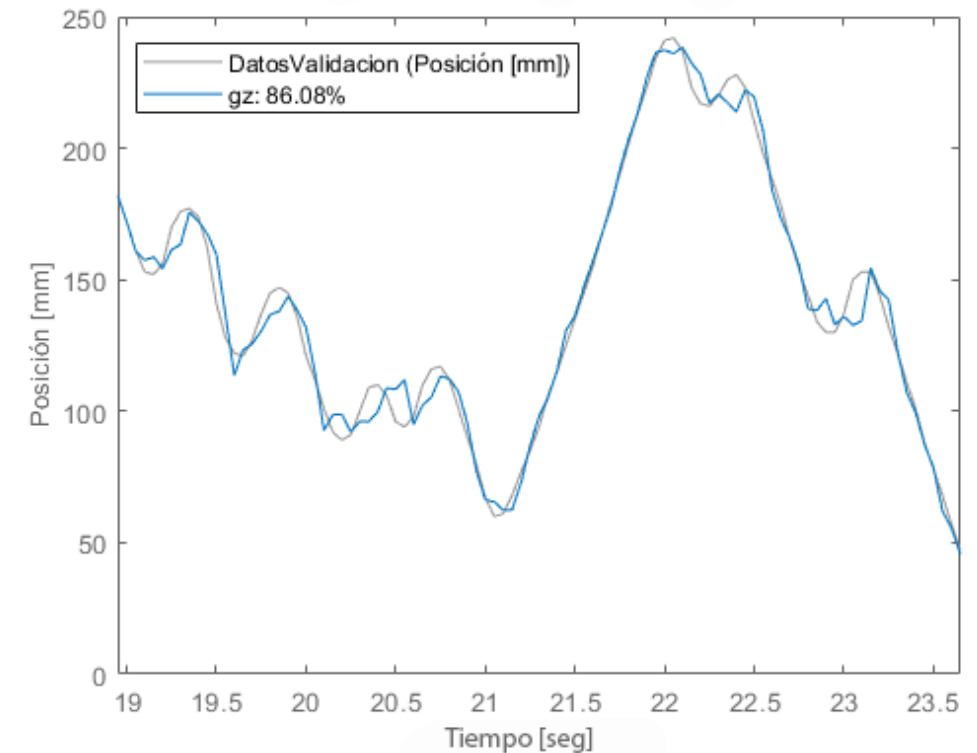
- Estimación del modelo

Número de polos	Número de ceros	Retardo a la respuesta	Orden	Ajuste [%]
1	0	0	1	86.7
1	1	0	2	89.0
2	1	0	3	93.6
2	2	0	4	94.5
3	1	0	4	93.6
3	2	0	5	94.5
3	3	0	6	95.0
1	0	1	1	86.7
1	1	1	2	92.3
2	1	1	3	94.3
2	2	1	4	94.8
3	1	1	4	94.3
3	2	1	5	94.8
3	3	1	6	95.2
1	0	2	1	86.7
1	1	2	2	93.0
2	1	2	3	93.3
2	2	2	4	93.4
3	1	2	4	93.4
3	2	2	5	93.6
3	3	2	6	93.7

- Modelo de la planta

$$g_z = \frac{6.108z}{z^2 - 1.692z + 0.6922}$$

- Validación del modelo



Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



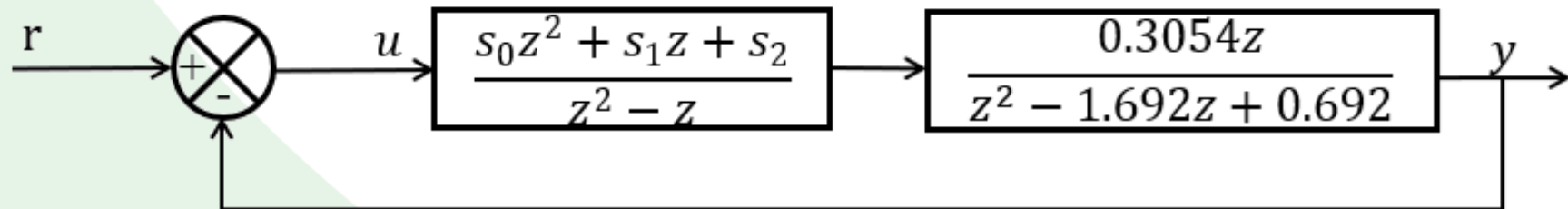
Sintonización del Controlador

- **Controlador PID digital**

Considerar

- Error estado estable <1% o (4.5mm)
- Controlador enfocado a la velocidad de respuesta

- **Diagrama de bloques**



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Sintonización del Controlador

- **Parámetros de desempeño**

Considerar

- Sistema controlado tenga frecuencia natural 3 veces mayor al sistema sin controlar
- Sistema controlado subamortiguado



$$\omega_o = 2.447 \text{ [rad/s]}$$

$$\zeta = 0.9$$

$$T_s = 0.05s$$

- **Sintonización por ubicación de Polos**

$$C(z) = \frac{1.8684z^2 - 3.2323z + 1.3932}{z^2 - z}$$

Controlador PID ensamblado con coeficientes

$$K_p = 0.475, T_i = 0.81, T_d = 0.147$$

Constantes del controlador PID ensamblado a la forma Estándar

$$K_D = 0.42, T_i = 0.63, T_d = 0.13$$

Constantes del controlador PID después del ajuste fino

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Diseño de la Interfaz Gráfica

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Los requerimientos de la HMI son:

- Comunicarse inalámbricamente con la red implementada para conectarse con el PLC.
- Desplegar la ventana de la HMI una vez se conecta con el PLC.
- Recibir datos acerca del estado del sistema (“Sp” y “Pv”) y usarlos para su visualización.
- Enviar los parámetros del controlador (“Kp”, “Ti” y “Td”) en caso de ser modificados por el operador.



Diseño de la Interfaz Gráfica

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

100 años

NOTA CONCEPTUAL

Desarrollo de Aplicaciones de un Sistema de Control de Posición de un Actuador Neumático con Válvula Proporcional

AUTORES
Vega Angel
Villacís Nicolás

TUTOR
Ing. Terneus Carlos

INICIO **CONTROL** **GRÁFICOS** **PARÁMETROS**



Diseño de la Interfaz Gráfica

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

The image displays two side-by-side screenshots of a software interface, each with a close button (X) in the top right corner. Both screenshots show a schematic diagram of a horizontal shaft with a central square component and four dots on either side. Below the diagram, the values for Sp and Pv are displayed in large, bold, black text. At the bottom of each screenshot, there are four blue buttons labeled INICIO, CONTROL, GRÁFICOS, and PARÁMETROS.

Parameter	Left Screenshot	Right Screenshot
Sp	178	398
Pv	182	399



Diseño de la Interfaz Gráfica

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Diseño de la Interfaz Gráfica

Antecedentes y Justificación

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Parámetros X

Kp: 0.39

Ti: 0.63

Td: 0.13

Ts: 0.05seg.

Cambiar

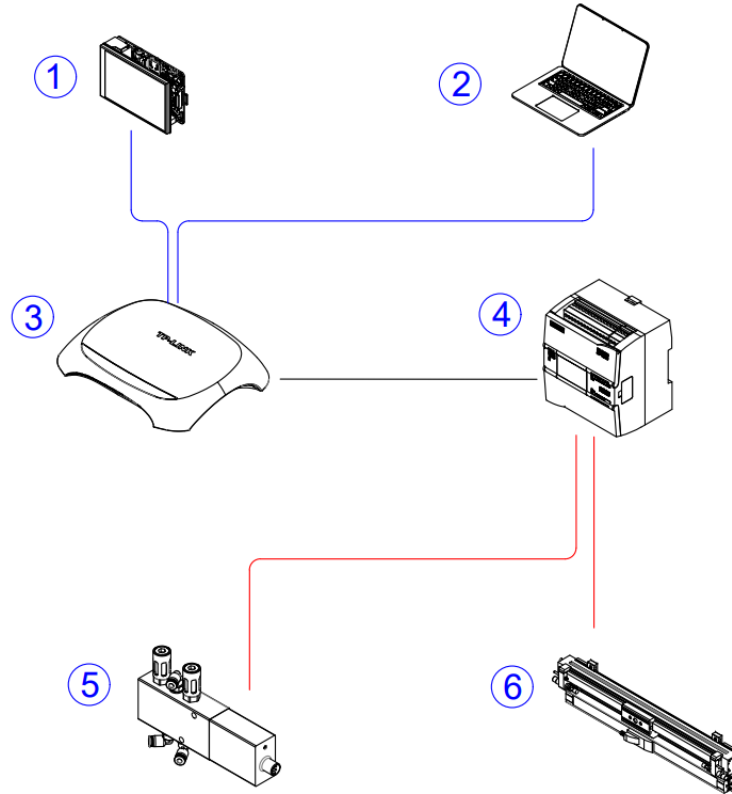
Reset




INICIO **CONTROL** **GRÁFICOS** **PARÁMETROS**



Comunicación entre Dispositivos

- Arquitectura de Comunicación



Línea	Medio de Comunicación
	WiFi
	Ethernet
	Cableado duro

No.	Dispositivo
1	Raspberry Pi
2	PC
3	Router
4	PLC S7-1200
5	Válvula Proporcional
6	Potenciómetro Lineal

- Direcciones IP de los dispositivos

Dispositivo	Dirección IP
Router	192.168.0.1
PLC s7-1200	192.168.0.5
PC	192.168.0.10
Raspberry PI	192.168.0.100

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Tarjeta para Proyección de HMI

- Raspberry Pi 3



- Características Técnicas

Característica	Valor
Pines GPIO	24
Procesador	4 núcleos / 1,2 GHz
Memoria RAM	1GB
GPU	400MHz
Memoria	Micro SD
Alimentación	5V 2.5Amp
Ethernet	Ethernet 10/10
Wireless	WiFi 2.4Ghz
USB	4 USB 2.0
Precio base	80\$

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

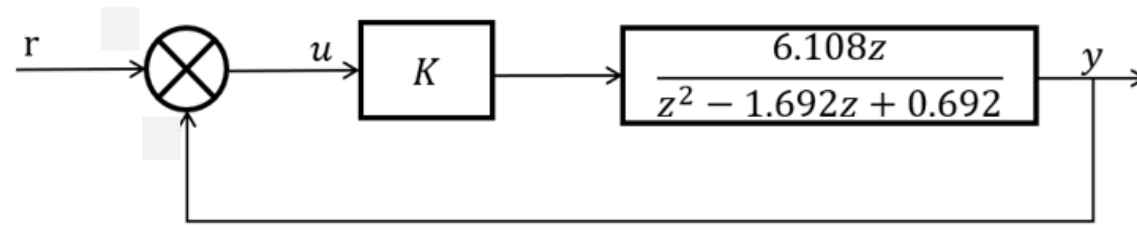
Recomendaciones

Trabajos futuros



Análisis de Estabilidad

- Por el método de Jury



Condiciones:

z^0	z^1	z^2		
0.692	$6.108K + 1.692$	1	$F(1) > 0$	$K > 0$
1	$6.108K + 1.692$	0.692	$(-1)^n * F(-1) > 0$	$K < 0.554$
$-1.88K - 0.521$	0	0	$ a_0 > a_n$	$1 > 0.692$
			$ b_0 > b_{n-1} $	$K \in [-\infty, +\infty]$

$$0 < K < 0.554$$

Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Análisis de Controlabilidad y Observabilidad

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

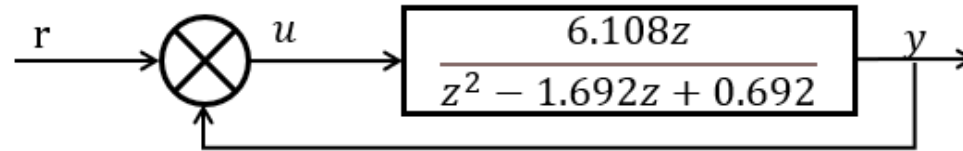
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



$$A = \begin{bmatrix} 1.692 & -0.692 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0.3054 \quad 0]; D = 0$$

- **Controlabilidad**

$$C_o = [B \ AB \ \dots \ A^{N-1}B] \longrightarrow C_o = \begin{bmatrix} 1 & 1.692 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{aligned} \det(C_o) &= 1 \\ \text{rank}(C_o) &= 2 \end{aligned}$$

- **Observabilidad**

$$Obs = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \longrightarrow Obs = \begin{bmatrix} 0.3054 & 0 \\ 0.5167 & -0.2114 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{aligned} \det(Obs) &= -0.0646 \\ \text{rank}(Obs) &= 2 \end{aligned}$$



Prueba Respuesta al Escalón

Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

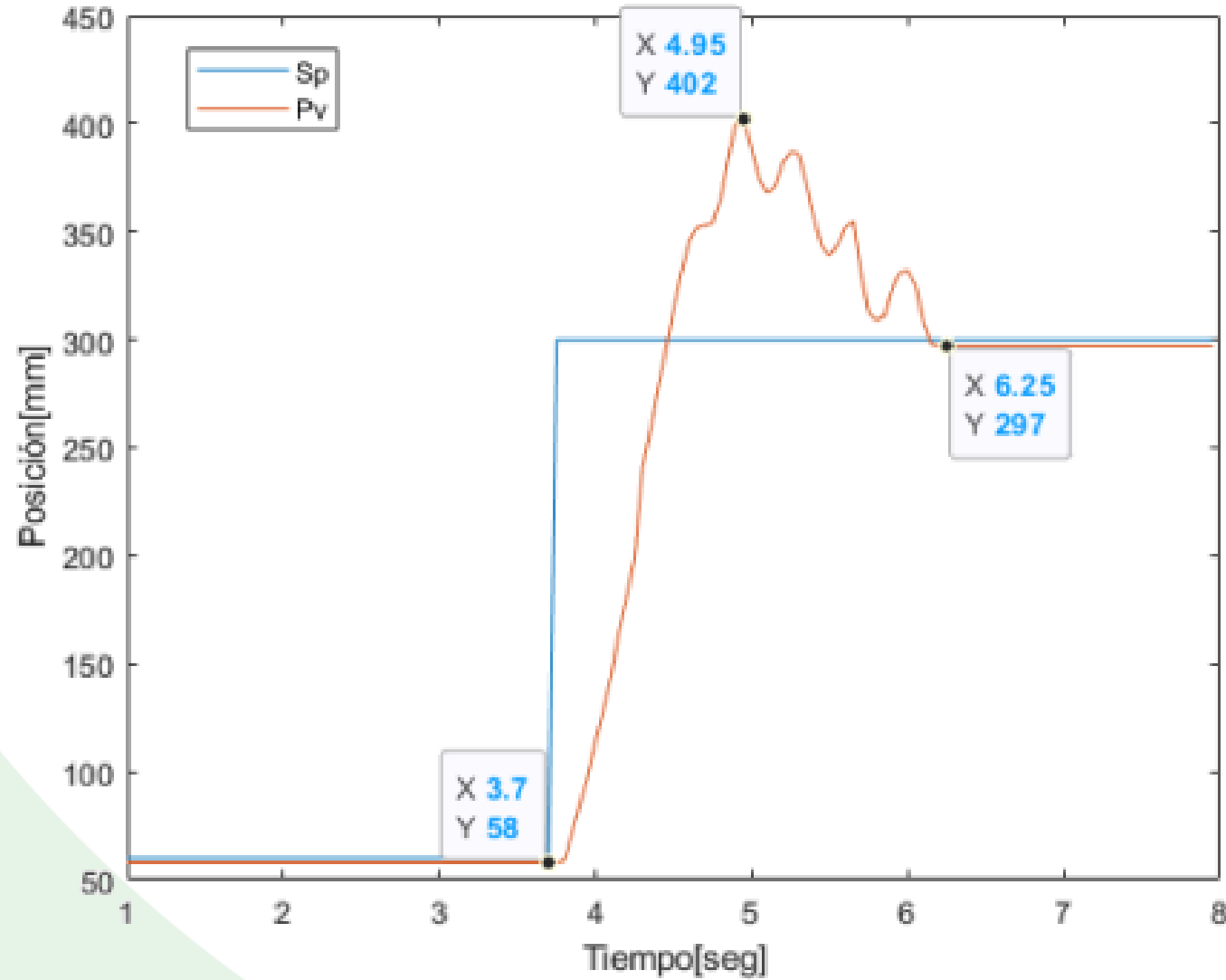
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



$T_s = 2.55 \text{ seg}$
Sobrepaso = 42.5 %



Prueba Seguimiento a Referencia

Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

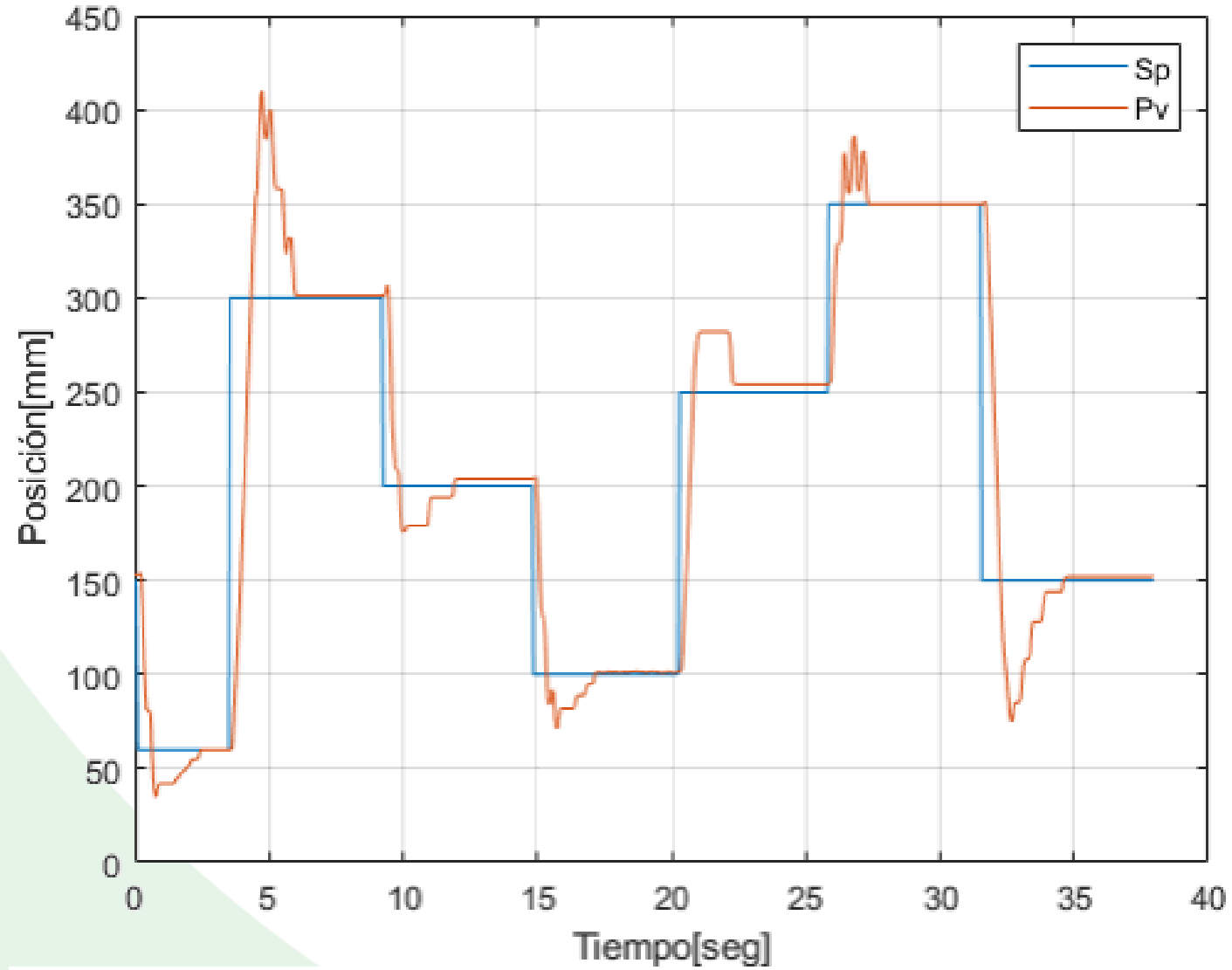
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



$T_s = 2.41 \text{ seg}$
Sobrepaso = 31.36 %



Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

Diseño y Construcción

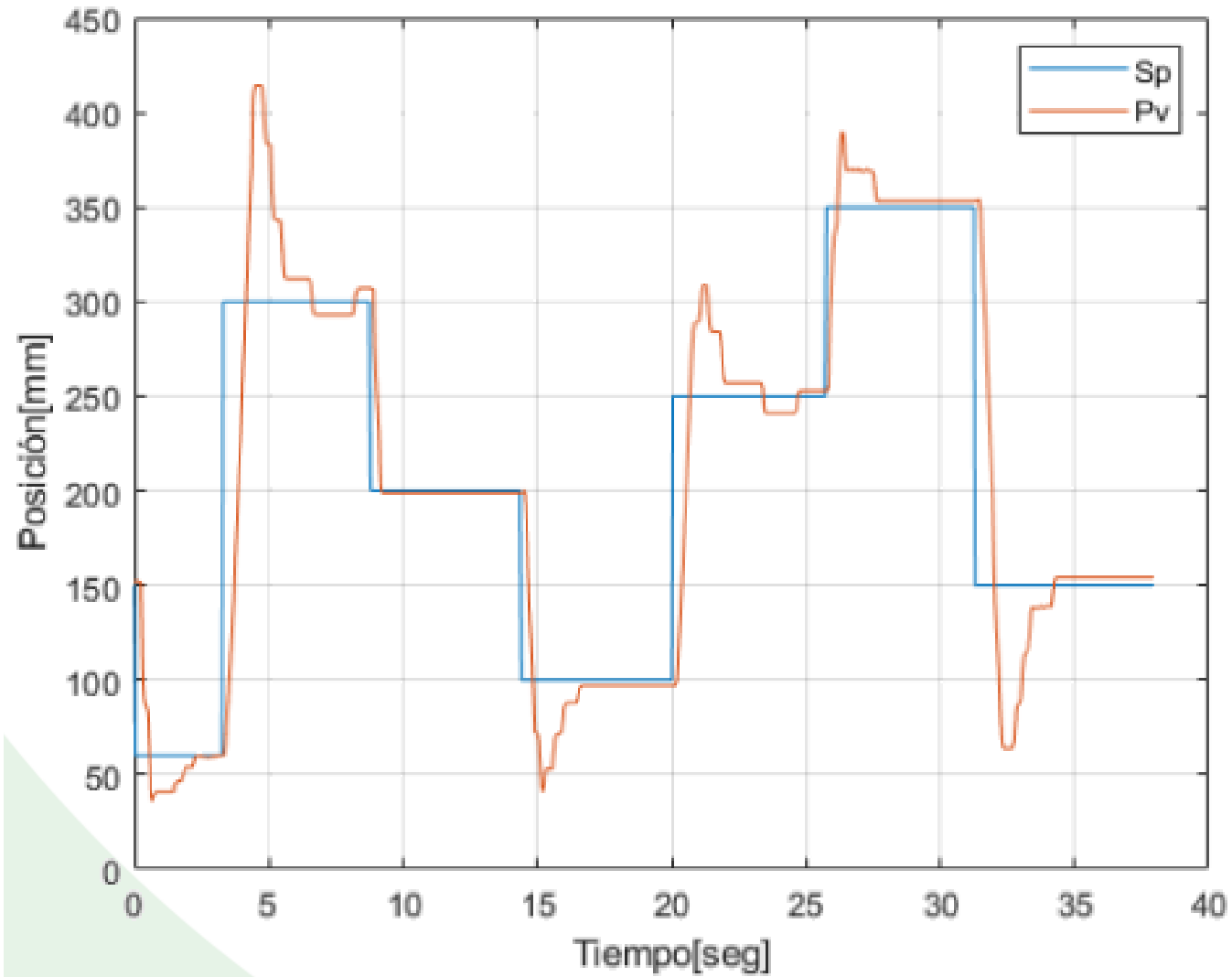
Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Prueba de Robustez



Presión: 4bar

$T_s = 2.66 \text{ seg}$
Sobrepaso = 42.4 %



Prueba de Seguimiento con Carga

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

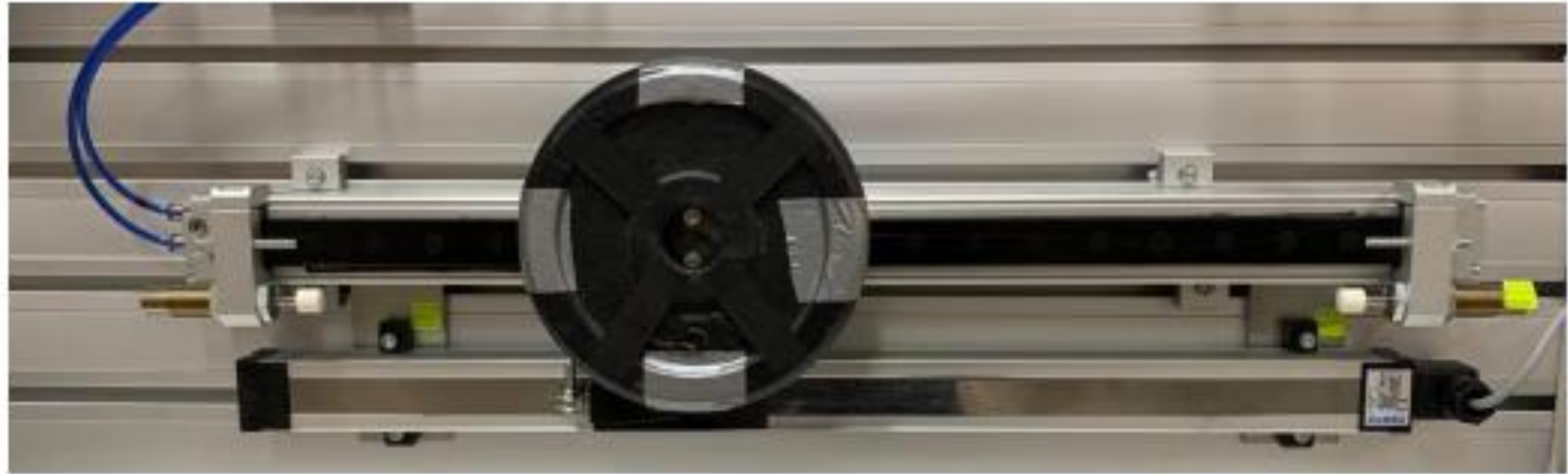
Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Carga de 2.5 kg acoplada a la corredera.





Prueba de Seguimiento con Carga

Introducción

Investigación Bibliográfica

Metodología

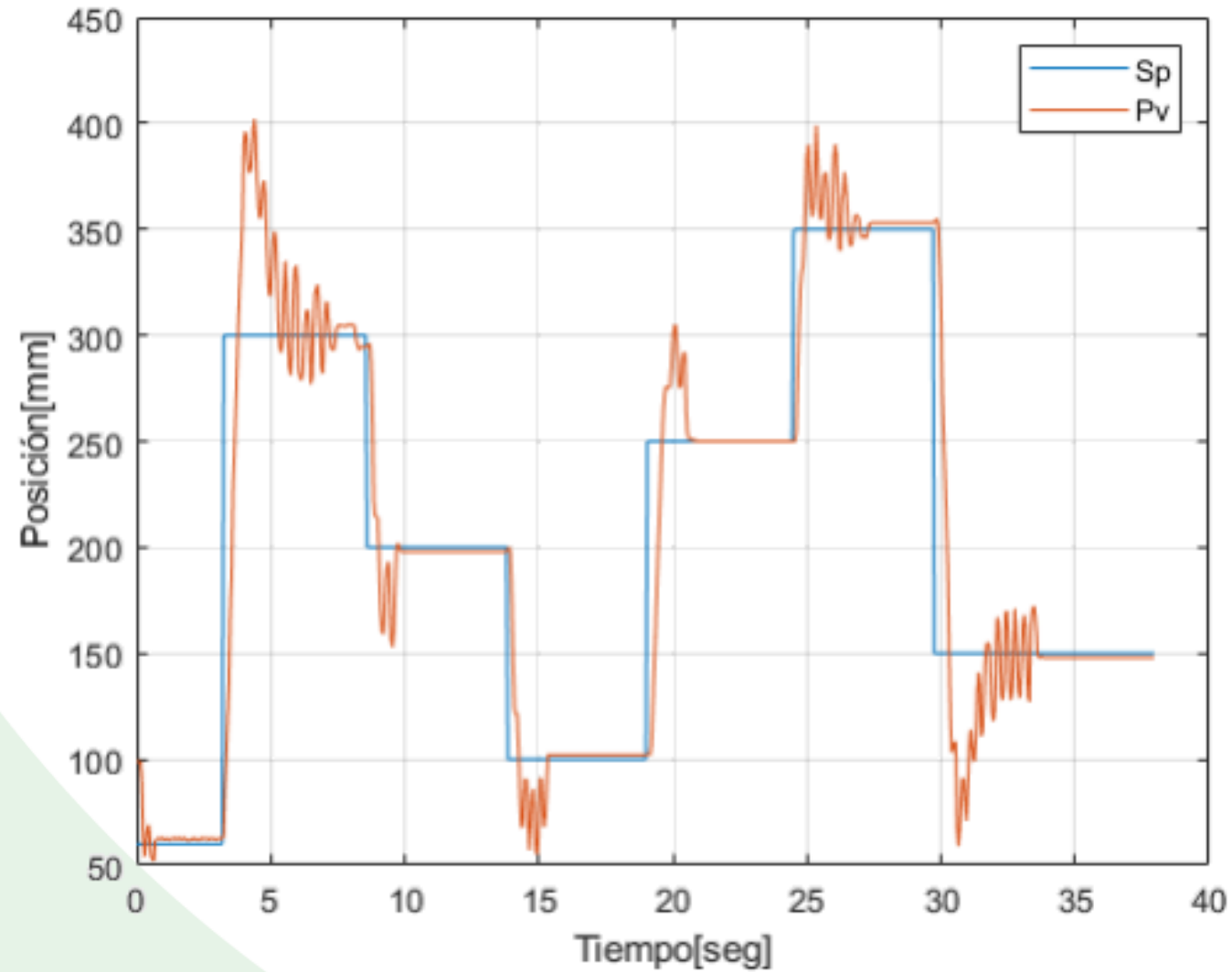
Diseño y Construcción

Pruebas y Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



$T_s = 2.62 \text{ seg}$
Sobrepaso = 44.16 %



Evaluación de la HMI

Criterio	Calificación	Observación
Arquitectura	4.67	Representación efectiva
Distribución	4.25	Consistente y balanceada
Navegación	5	Simple e intuitiva
Uso de color	4.67	Alto contraste
Información textual	4.625	Texto apropiado
Símbolos y representación de equipos	4.33	Gráficos apropiados
Valores de proceso	4.8	Visualización importante
Tablas y grupos de tendencia	3.83	Sin configuración
Comando e ingreso de datos	4	Fácil maniobrabilidad
Alarmas	1	Sin uso de alarmas

Calificación de 1 a 5. Promedio de 3.96

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros



Producto Final

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

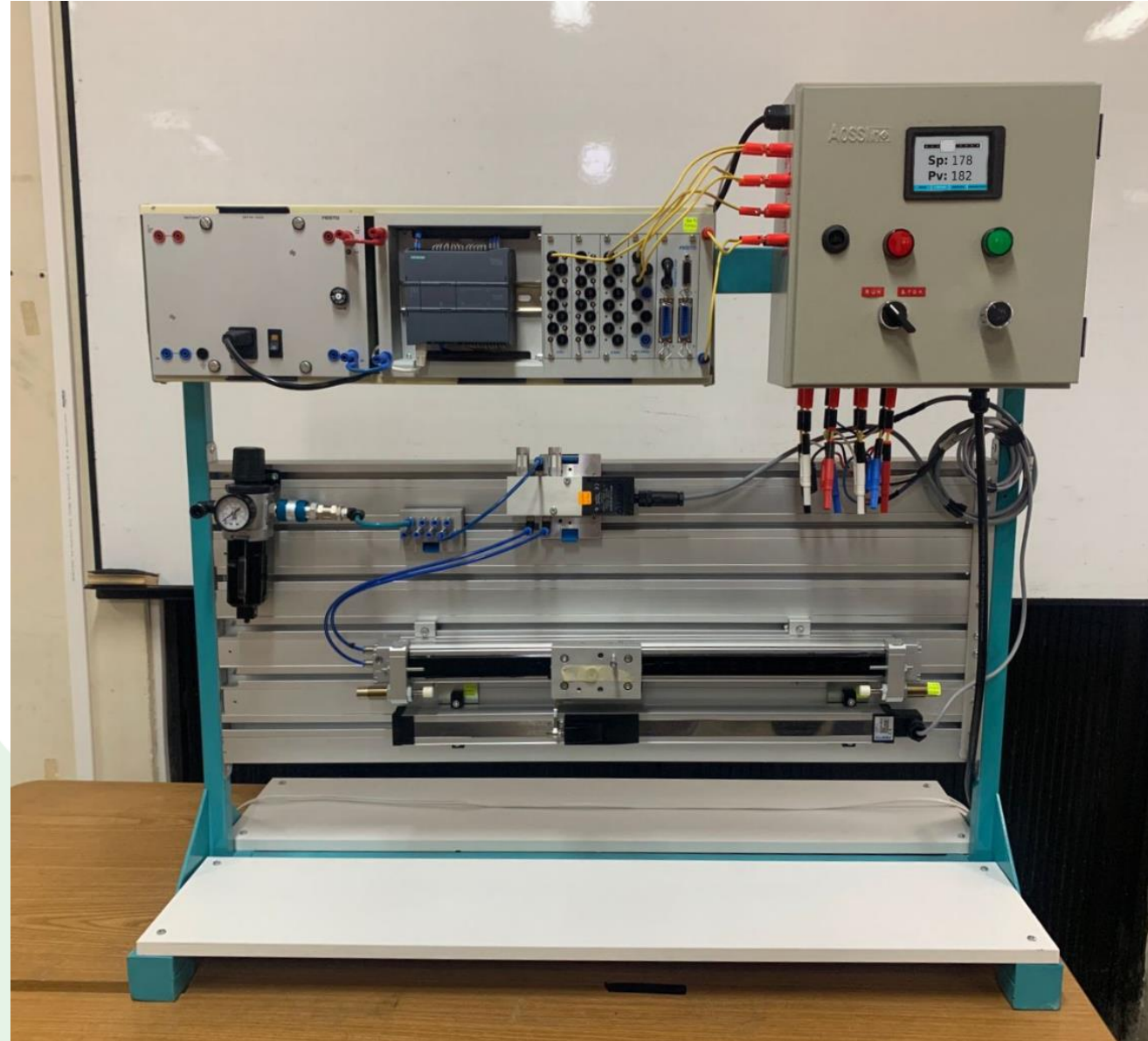
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Conclusiones

- Se implementó una estación que comprende un sistema de control de posición de un actuador neumático mediante PLC y válvula proporcional, una interfaz permite el uso y configuración por parte de estudiantes y docentes brindando funcionalidad a esta herramienta didáctica con potencial aplicabilidad industrial.
- Previo a la identificación del sistema se realizó un proceso de reducción de banda muerta que consiste en evitar un rango de valores que no producen una respuesta al sistema, este proceso eliminó substancialmente las no linealidades introducidas por banda muerta y mejoró los resultados del proceso de identificación.
- Mediante un método para sistemas “black box” se identificó la planta conformada por válvula, actuador y potenciómetro, obteniendo un modelo que arroja 86.08% de ajuste con el sistema real. Este modelo se empleó para la sintonización del controlador PID mediante el método de ubicación de polos en tiempo discreto apuntando a un desempeño rápido y agresivo para el sistema controlado. El comportamiento del sistema resultante es de un tiempo de establecimiento máximo de 2.55 segundos y un sobrepaso máximo de 42.5%
- Una valoración mediante los criterios de la guía Gedis a la interfaz implementada arrojó un resultado de 3.96 puntos en una escala de 1 a 5 puntos denotando la capacidad de la interfaz de cumplir mayormente con las recomendaciones de la guía.



Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

Recomendaciones

- En caso de ser un problema, para evitar fluctuaciones en la presión de entrada al momento de que el sistema realice movimientos bruscos se recomienda emplear un tanque de almacenamiento de aire que asegure tener una presión de aire constante durante todo el funcionamiento.
- Para evitar que la corredera alcance los extremos del actuador y que los datos obtenidos durante la identificación sean adecuados para el ajuste a un modelo lineal, se recomienda emplear valores de entrada pequeños y anchos de pulsos cortos para reducir el movimiento de la corredera y reducir el número de veces que esta choca con los extremos.
- Para la sintonización por el método de ubicación de polos se emplean características de desempeño deseadas para el sistema controlado, se recomienda que, para una aplicación específica se seleccionen características de desempeño que busquen cumplir de forma específica los requerimientos de dicha aplicación.



Trabajos Futuros

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros

- Se tienen 2 propuestas para un proyecto a realizar empleando este trabajo como punto de partida. El primero es realizar la identificación de la planta empleando modelos no lineales como el Hammerstein-Wiener que toma en cuenta la zona muerta para los valores de entrada al sistema y la saturación de la posición de la corredera al chocar con un extremo a la salida del sistema y explorar la efectividad de las identificaciones con modelos no lineales. El segundo es realizar una aplicación que emplee el control de posición del actuador lineal en su funcionamiento (ej. Pick and place, posicionador de objetos, clasificador, etc), cabe recalcar que los elementos empleados como un router y una placa Raspberry Pi de software libre y la estación de trabajo permiten el escalamiento y adición de funciones al proyecto.



Video de funcionamiento

Introducción

Investigación
Bibliográfica

Metodología

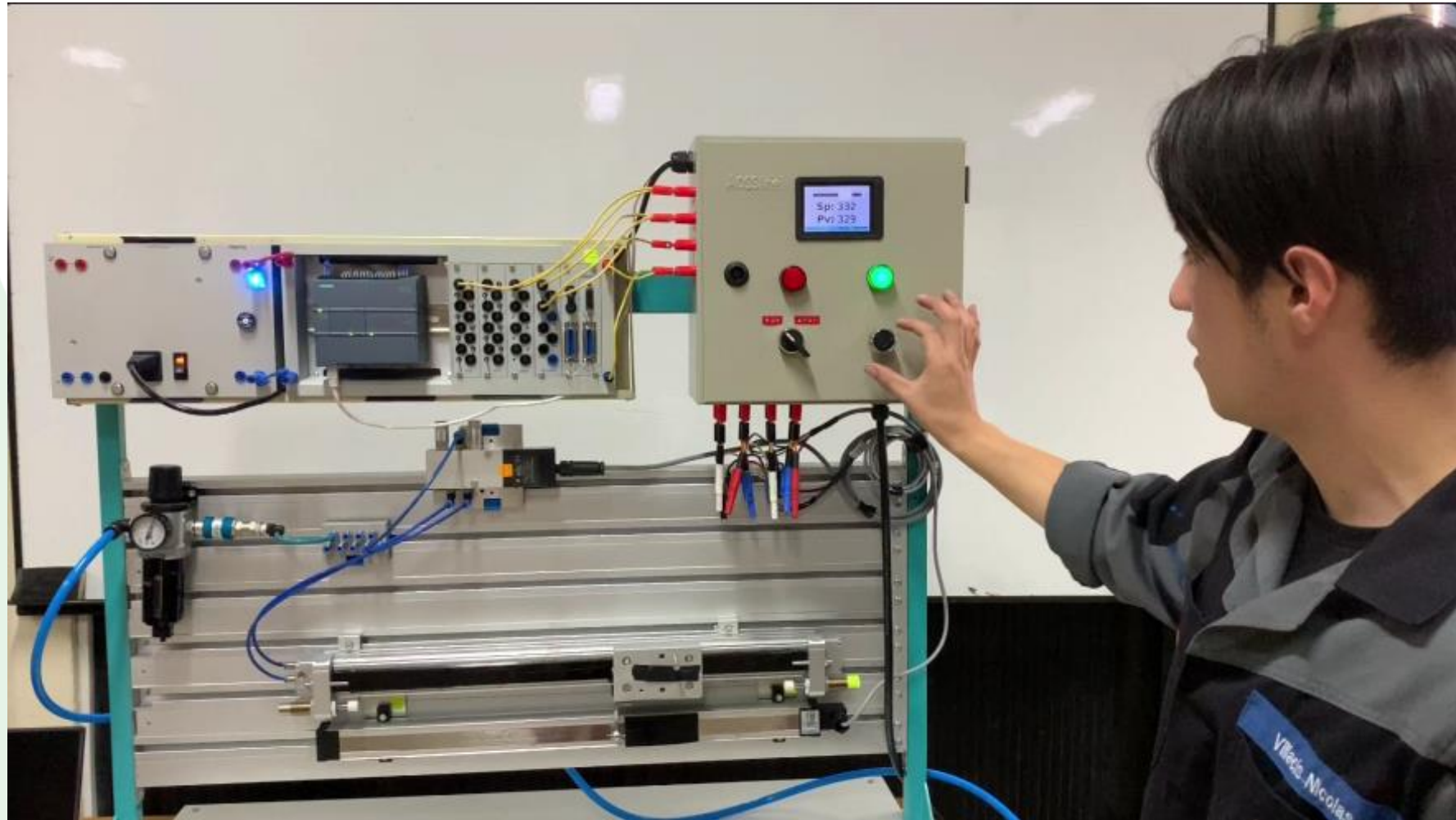
Diseño y
Construcción

Pruebas y
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos futuros





ECUADOR

ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ECUADOR



MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

VEGA TINITANA ANGEL DAMIAN
VILLACÍS LEÓN NICOLÁS EDISON
Agosto – 2023