



**Desarrollo de aplicaciones de un sistema de control de posición de un actuador  
neumático con válvula proporcional**

Vega Tinitana, Ángel Damian y Villacís León, Nicolás Edison

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

Ing. Terneus Páez, Carlos Francisco

09 de septiembre del 2023

## T-ESPE-VLNE-VTAD-V3A.pdf

### Scan details

Scan time:  
August 20th, 2023 at 15:45 UTC

Total Pages:  
105

Total Words:  
26161

### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	1.9%	496
Minor Changes	0.9%	248
Paraphrased	4.8%	1265
Omitted Words	0%	0

### AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

### Plagiarism Results: (62)

#### Tesis I.M. 294 - Caiza Lema Luis Fabián.pdf

<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/13...>

USER

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA PROYECTO DE...



CARLOS FRANCISCO TERREUS PABO

1.1%

#### ¿Qué es la Unidad de Mantenimiento o FRL y cómo ...

<https://blog.comparasoftware.com/unidad-de-mantenimiento/>

Ir al contenido ...

0.5%

#### Control automático Los sistemas de control autom...

<https://1library.co/article/control-autom%c3%a1tico-sistema...>

...

0.4%



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Desarrollo de aplicaciones de un sistema de control de posición de un actuador neumático con válvula proporcional"** fue realizado por los señores **Vega Tinitana Ángel Damián** y **Villacís León Nicolás Edison**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 09 de septiembre de 2023**



**Ing. Terneus Páez, Carlos Francisco**

C. C. 1707217244



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Vega Tinitana Ángel Damián con cédula de ciudadanía n° 1105748535 y Villacís León Nicolás Edison con cédula de ciudadanía n° 1724693773, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular de título: **Desarrollo de aplicaciones de un sistema de control de posición de un actuador neumático con válvula proporcional** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 09 de septiembre de 2023

Vega Tinitana Ángel Damián

C. C. 1105748535

Villacís León Nicolás Edison

C. C. 1724693773



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

**Autorización de Publicación**

Nosotros, **Vega Tinitana Ángel Damián** con cédula de ciudadanía n° 1105748535 y **Villacís León Nicolás Edison** con cédula de ciudadanía n° 1724693773, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular de título: **Desarrollo de aplicaciones de un sistema de control de posición de un actuador neumático con válvula proporcional** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 09 de septiembre de 2023**

**Vega Tinitana Ángel Damián**

C. C. 1105748535

**Villacís León Nicolás Edison**

C. C. 1724693773

## **Dedicatorias**

Con amor y gratitud infinitos, dedico este trabajo de titulación a mis padres, Rigoberto Vega y Rosa Tinitana. Su amor incondicional, apoyo constante, sacrificio y paciencia han sido el motor que impulsó mi búsqueda de conocimiento y me llevó al éxito en esta meta.

Sus sabios consejos y guía incalculable han sido mi faro en este viaje. A pesar de la distancia física, sus valores y enseñanzas han sido mi inspiración constante y la razón por la que he cumplido mi promesa de alcanzar este sueño.

Este logro no solo es mío, sino también suyo. Cada paso que he dado lleva la huella de su amor y dedicación. Con regocijo y gratitud, les dedico este trabajo, expresando mi profunda admiración y amor eterno.

**Ángel Damian Vega Tinitana**

“El sacrificio es desprenderse de algo preciado en el presente, como ofrenda para mejorar el futuro”

Jordan B. Peterson

A mis padres Marcelo y Carmen quienes no solo me dieron la vida, sino que también sacrificaron parte de la suya para que yo pueda ser la persona en la que me he convertido. Les dedico este y todos los logros de mi esfuerzo, sé que están tan orgullosos de mí, como yo estoy de llamarlos Papá y Mamá.

A mis hermanos David y Gina con quienes crecí, peleé, jugué y aprendí. El cariño y afecto incondicional por su hermanito es la motivación que me llevó a continuar y seguir adelante en la persecución de mis metas, a ustedes se lo dedico.

**Nicolás Edison Villacís León**

## **Agradecimientos**

Primeramente, quiero agradecer a Dios por permitirme culminar este logro con salud y éxito.

Un agradecimiento especial a mis queridos padres, Rigoberto Vega y Rosa Tinitana. Su amor incondicional, sacrificio y fe constante en mí han sido el motor detrás de mi desempeño y perseverancia para alcanzar este logro. Este hito no solo pertenece a mí, sino que lleva impresa la dedicación y el amor incansables de ustedes. Con orgullo les digo hoy: ¡Padre, Madre, ¡lo hemos logrado juntos!

Mi sincero agradecimiento a todas las personas que estuvieron a mi lado, en especial a mis familiares y amigos por acompañarme en esta etapa formativa. Sus palabras motivadoras y constante disposición para escucharme fueron un bálsamo en momentos de estrés. A mis amigos las largas sesiones de estudio, risas compartidas y discusiones profundas nos unieron como amigos y compañeros de vida.

Expreso mi más profundo agradecimiento a los profesores que formaron parte de mi educación. Ustedes proporcionaron los cimientos sólidos de mis conocimientos y respondieron a mis inquietudes con paciencia y dedicación.

En esta etapa de celebración y logro, quiero agradecer especialmente a mi tutor, el Ing. Carlos Terneus. Su orientación, dedicación, paciencia y compromiso han sido pilares fundamentales en el éxito de este trabajo de titulación. Agradezco su disposición constante y la sabiduría que compartió conmigo.

**Ángel Damian Vega Tinitana**



Agradezco a Dios y todo lo que esta palabra comprende por cada aliento, cada oportunidad y cada bendición en mi vida.

Agradezco a mis padres, los valores que rigen mi vivir me fueron inculcados con su enseñanza y los frutos de mi trabajo son en parte frutos de su trabajo, a mis hermanos que fueron las personas con las que crecí y tejí tantos recuerdos que atesoraré por siempre.

A mi familia, son los faros de mi felicidad y mi refugio en momentos de debilidad, su presencia en mi vida ha sido un constante recordatorio de la importancia de la conexión humana y el apoyo mutuo. Por medio de las risas compartidas, conversaciones profundas y el simple acto de estar juntos me queda claro que siempre contaré con ustedes.

A mis amigos y conocidos, les agradezco llenar mi vida de color y diversidad. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi corazón. Gracias por los momentos compartidos, las locuras y por estar allí en los momentos en que más los necesité, nuestra amistad ha enriquecido mi vida de formas que no puedo expresar con palabras.

Quiero también agradecer a las personas que han formado parte de mi formación profesional, docentes de la universidad, compañeros y, sobre todo, a mi tutor y compañero de este proyecto.

A todos, desde lo más profundo de mi ser, les doy las gracias por ser parte de mi historia y de este logro alcanzado.

**Nicolás Edison Villacís León**

## Índice de Contenido

Reporte de verificación de contenido .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de auditoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatorias .....	6
Agradecimientos .....	8
Resumen .....	20
Abstract.....	21
Capítulo I Generalidades del Proyecto.....	22
Introducción .....	22
Planteamiento del Problema .....	23
Justificación e importancia .....	24
Objetivos.....	25
Objetivo General .....	25
Objetivos Específicos .....	25
Alcance .....	26
Capítulo II Fundamentos teóricos.....	29
Error.....	29
Exactitud .....	29
Precisión .....	29

	11
Zona muerta.....	30
Sensibilidad.....	31
Repetibilidad .....	31
Histéresis .....	31
Resolución .....	32
Ruido .....	32
Transformada de Laplace y función de transferencia .....	32
Estabilidad en sistemas de control .....	33
Orden de sistemas .....	37
Linealidad y no-linealidad.....	37
Error de estado estable .....	38
Sistema de control .....	38
Elementos en un sistema de control.....	39
Estrategias de control .....	40
Sistemas de control de lazo abierto.....	40
Sistemas de control en lazo cerrado.....	41
Identificación de sistemas .....	42
Algoritmo de adaptación de parámetros.....	44
Pseudo-random binary sequences (PRBS).....	46
Uso de PRBS para la identificación de un sistema.....	46
Tipos de control.....	47

	12
Controladores digitales.....	48
Control proporcional (P) .....	48
Control proporcional-integral (PI).....	49
Control proporcional-derivativo (PD).....	51
Control proporcional-integral-derivativo (PID).....	52
Sistemas en tiempo discreto .....	53
Muestreo de señales en tiempo continuo .....	54
Modelado de espacios de estado .....	57
Tiempo de muestreo .....	58
Análisis de respuesta de sistemas .....	60
Respuesta transitoria .....	60
Estabilidad en tiempo discreto.....	62
Criterio de estabilidad de Jury. ....	66
Controlabilidad y observabilidad.....	68
Sintonización de controladores PID en tiempo discreto.....	70
Ubicación de polos .....	70
Sistema neumático.....	73
Unidad de mantenimiento neumático .....	74
Válvula proporcional direccional de caudal.....	75
Finalidad de una válvula distribuidora en un circuito de regulación en bucle cerrado ..	77
Actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago .....	77

Potenciómetro lineal.....	79
Controlador lógico programable (PLC) .....	80
Human machine interface (HMI).....	81
Capítulo III Diseño e Implementación.....	83
Metodología de diseño .....	83
Definición de requerimientos .....	84
Diseño del sistema .....	84
Diseño de sistemas específicos .....	85
Integración del sistema.....	85
Modelamiento y simulación .....	85
Verificación y validación .....	86
Producto.....	86
Requerimientos soporte estructural.....	86
Diseño soporte estructural .....	87
Requerimientos sistema neumático.....	88
Montaje sistema neumático.....	89
Requerimientos sistema de medición y control .....	89
Adquisición variable posición .....	90
Programación del PLC .....	91
Diseño y construcción tablero eléctrico. ....	94
Comunicación de dispositivos .....	97

Definición de la planta.....	99
Consideraciones de la planta .....	101
Reducción banda muerta .....	102
Rampa con pendiente positiva .....	104
Rampa con pendiente negativa .....	105
Algoritmo para reducción banda muerta.....	106
Centrado en valor cero a la planta .....	106
Identificación planta .....	107
Definición del experimento .....	108
Excitación con PRBS .....	109
Estimación del modelo de la planta .....	110
Definición de características de desempeño .....	112
Sintonización controlador PID .....	112
Ajuste fino de constantes controlador PID.....	114
Algoritmo de error admisible .....	115
Diseño HMI .....	115
Programación raspberry Pi.....	117
Implementación pantallas.....	117
Integración de sistemas .....	122
Capítulo IV Análisis y resultados.....	123
Análisis de estabilidad.....	123

Análisis de controlabilidad.....	124
Análisis de observabilidad.....	125
Prueba respuesta al escalón.....	125
Prueba seguimiento a la referencia.....	127
Prueba de robustez.....	128
Prueba de seguimiento con carga.....	130
Producto final.....	132
Evaluación HMI.....	133
Capitulo V Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....	136
Conclusiones.....	136
Recomendaciones.....	138
Trabajos futuros.....	139
Bibliografía.....	140
Apéndices.....	143

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Distribución de la prueba de estabilidad de Jury .....	66
<b>Tabla 2</b> Características sistemas neumáticos. ....	73
<b>Tabla 3</b> Características Principales PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC.....	92
<b>Tabla 4</b> Características Principales 6ES7232-4HA30-0XB0 Siemens.....	93
<b>Tabla 5</b> Dirección IP de los dispositivos.....	99
<b>Tabla 6</b> Porcentaje de ajuste para diferentes modelos en la identificación con PRBS. ....	110
<b>Tabla 7</b> Distribución de la prueba de estabilidad de Jury para el modelo encontrado .....	123
<b>Tabla 8</b> Evaluación de HMI bajo criterios guía Gedis.....	133



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Partes principales del sistema: Planta, Control y Visualización. ....	26
<b>Figura 2</b> Estación Diseñada para el Proyecto.....	27
<b>Figura 3</b> Efectos de la variación de la exactitud y precisión en las respuestas de un experimento. ....	30
<b>Figura 4</b> Curva de histéresis de un termómetro.....	31
<b>Figura 5</b> Función de transferencia de un sistema. ....	33
<b>Figura 6</b> Criterio para determinar la estabilidad de un sistema. ....	34
<b>Figura 7</b> Zona recomendada para la ubicación de polos. ....	35
<b>Figura 8</b> Diagrama de polos y ceros para diferentes funciones de transferencia $G(s)$ . ....	36
<b>Figura 9</b> Esquema general de un sistema de control.....	38
<b>Figura 10</b> Estructura de un sistema de control. ....	40
<b>Figura 11</b> Sistema de control en lazo abierto. ....	41
<b>Figura 12</b> Sistema de control en lazo cerrado. ....	42
<b>Figura 13</b> Principios de diseño de un controlador.....	43
<b>Figura 14</b> Metodología de identificación de sistemas. ....	44
<b>Figura 15</b> Modelo adaptativo de estimación de parámetros.....	45
<b>Figura 16</b> Generación de un PRBS de longitud 31 .....	46
<b>Figura 17</b> Topología de un Control Digital. ....	48
<b>Figura 18</b> Diagrama de bloques control proporcional. ....	49
<b>Figura 19</b> Diagrama de bloques de un control proporcional-integral.....	50
<b>Figura 20</b> Señales de error y de control PI. ....	51
<b>Figura 21</b> Diagrama de bloques control Proporcional-Derivativo. ....	51
<b>Figura 22</b> Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo-Derivativo. ....	52
<b>Figura 23</b> Señal control PID. ....	53
<b>Figura 24</b> Diagrama esquemático de un sistema controlado por ordenador. ....	54

<b>Figura 25</b> Efecto de la transformación del cambio de variable.....	55
<b>Figura 26</b> Modelo de sistema en tiempo continuo. ....	55
<b>Figura 27</b> Diagrama de bloques de un sistema de control lineal representado en el espacio de estados. ....	58
<b>Figura 28</b> Curva de respuesta escalón unitario. ....	61
<b>Figura 29</b> Tabla construida a partir del criterio de Routh-Hurwitz .....	65
<b>Figura 30</b> Coeficientes del método de Routh-Hurwitz.....	65
<b>Figura 31</b> Coeficientes del criterio de Jury.....	67
<b>Figura 32</b> Sistema incontrolable. ....	68
<b>Figura 33</b> Sistema inobservable. ....	69
<b>Figura 34</b> Planta con retroalimentación del estado.....	72
<b>Figura 35</b> Unidad de mantenimiento y símbolo según Norma ISO1219-1. ....	74
<b>Figura 36</b> Válvula proporcional direccional de caudal y su simbología en Norma ISO1219-1...76	
<b>Figura 37</b> Esquema de componentes de una válvula proporcional direccional.....	76
<b>Figura 38</b> Actuador neumático lineal de doble efecto y su simbología en Norma ISO1219-1 ...78	
<b>Figura 39</b> Partes principales de un actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago.....	79
<b>Figura 40</b> Potenciómetro lineal y su simbología en Norma ISO1219-1 .....	80
<b>Figura 41</b> PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC Siemens .....	81
<b>Figura 42</b> Modelo V como macrociclo para el proyecto. ....	83
<b>Figura 43</b> Diseño soporte estructura con medidas principales.....	87
<b>Figura 44</b> Estructura construida con canaletas, tablas y caja eléctrica montadas.....	88
<b>Figura 45</b> Sistema neumático montado. ....	89
<b>Figura 46</b> Adquisición de variable posición.....	90
<b>Figura 47</b> Módulo de salida analoga 6ES7232-4HA30-0XB0 Siemens. [Siemens AG, 2023] ...91	
<b>Figura 48</b> Elementos internos de tablero eléctrico.....	95
<b>Figura 49</b> Parte frontal del tablero eléctrico. ....	96

<b>Figura 50</b> Arquitectura de Comunicación.....	98
<b>Figura 51</b> Entrada y salida del conjunto: válvula neumática, actuador y potenciómetro lineales. .....	99
<b>Figura 52</b> Caudal de salida en las vías (1 a 2) y (1 a 4) en función del voltaje de entrada.....	101
<b>Figura 53</b> Comportamiento del error para valores pequeños en la respuesta del controlador.	103
<b>Figura 54</b> Resultados prueba de rampa positiva. ....	104
<b>Figura 55</b> Resultados prueba de rampa negativa. ....	105
<b>Figura 56</b> Diagrama de flujo de la escritura del valor de control. ....	107
<b>Figura 57</b> Resultados excitación con PRBS. ....	109
<b>Figura 58</b> Validación función de transferencia obtenida en prueba con PRBS. ....	111
<b>Figura 59</b> Diagrama de bloques del sistema controlado por un controlador PID.....	113
<b>Figura 60</b> Pantalla Táctil de 3.5 pulgadas UCTRONICS.....	116
<b>Figura 61</b> Raspberry Pi 3 Modelo B+.....	116
<b>Figura 62</b> Pantalla de Inicio. ....	118
<b>Figura 63</b> Pantalla de Control.....	118
<b>Figura 64</b> Pantalla de Gráficos. ....	120
<b>Figura 65</b> Pantalla de Parámetros. ....	121
<b>Figura 66</b> Integración de sistemas.....	122
<b>Figura 67</b> Diagrama de bloques del modelo encontrado para el análisis de estabilidad. ....	123
<b>Figura 68</b> Prueba escalón al sistema controlado. ....	126
<b>Figura 69</b> Prueba seguimiento al sistema controlado. ....	127
<b>Figura 70</b> Prueba robustez al sistema controlado.....	129
<b>Figura 71</b> Sistema con carga (2.5kg) acoplada. ....	130
<b>Figura 72</b> Prueba de seguimiento con carga al sistema controlado.....	131
<b>Figura 73</b> Producto Final. ....	132

## Resumen

Los actuadores neumáticos son ampliamente utilizados para llevar a cabo una variedad de tareas que requieren altos niveles de velocidad, precisión y fuerza, como el desplazamiento, tracción, transporte, sujeción y rotación de productos o materiales en entornos industriales. Con el aumento de las demandas en la industria, la velocidad y la precisión se convierten en factores críticos para mejorar la eficiencia de los procesos.

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un sistema de control para regular la posición de un actuador lineal neumático. La planta por controlar está compuesta por una válvula proporcional direccional y un actuador neumático lineal equipado con un potenciómetro lineal.

El control se lleva a cabo mediante un regulador PID incorporado en un controlador PLC.

Además, el estado operativo del equipo y los parámetros del regulador se presentan en tiempo real a través de una interfaz HMI. Esto permite observar la repuesta del sistema en diferentes posiciones y brinda la capacidad de ajustar los parámetros del regulador.

Los resultados obtenidos muestran, un modelamiento de la planta con un ajuste del 86.08%, un controlador sintonizado por el método de ubicación de polos con un comportamiento agresivo y característica subamortiguada, con esto el sistema controlado es robusto frente a perturbaciones de carga y presión, logrando mantener un error en estado estable por debajo del 1% y posicionando el actuador rápidamente en la posición deseada.

*Palabras clave:* Neumática, control, posición, regulador, interfaz.

### **Abstract**

Pneumatic actuators are widely used to carry out a variety of tasks that require high levels of speed, precision, and force, such as displacement, traction, transportation, gripping, and rotation of products or materials in industrial environments. With the increasing demands in the industry, speed and precision become critical factors in enhancing process efficiency.

The present work consists of the development of a control system to regulate the position of a pneumatic linear actuator. The plant to be controlled is composed of a directional proportional valve and a pneumatic linear actuator equipped with a linear potentiometer. The control is carried out by means of a PID controller incorporated in a PLC controller. In addition, the operating status of the equipment and the controller parameters are displayed in real time via an HMI interface. This allows observing the system response in different positions and provides the ability to adjust the controller parameters.

The results obtained show a plant modeling with a tuning of 86.08%, a controller tuned by the pole location method with an aggressive behavior and a sub-steady state characteristic, with this the controlled system is robust against load and pressure disturbances, managing to maintain a steady state error below 1% and positioning the actuator quickly in the desired position.

*Keywords:* Pneumatics, control, position, regulator, interface.

## Capítulo I

### Generalidades del Proyecto

#### Introducción

Los actuadores neumáticos son elementos ampliamente usados en la industria para diversas tareas entre las que se encuentran empujar, halar, transportar, agarrar, soltar, rotar, etc., productos o material en un proceso, estas tareas se realizan con altas velocidades, gran precisión y fuerzas elevadas.

Con el paso del tiempo, los requerimientos en los procesos industriales aumentan; mayor velocidad y precisión son dos factores de gran importancia al momento de determinar la eficiencia de un proceso, por lo que, desarrollar técnicas de control que apunten a la mejora de estos factores es de vital importancia para mantener una industria en un nivel competitivo.

Los controladores PID son la técnica usada con más frecuencia para el control de un proceso donde los actuadores tienen una respuesta analógica la cual se busca aproximar a un valor determinado. Los PLC o autómatas programables son dispositivos electrónicos que reciben y entregan señales eléctricas por medio de sus puertos de entrada y salida, los mismos cumplen una serie de órdenes programadas en su CPU; el uso de PLC para la implementación de controladores PID es una práctica común en la industria.

Este proyecto trata del diseño e implementación de un sistema de control de posición de un actuador neumático lineal de doble efecto mediante un controlador PID con tecnología PLC, el estado del equipo y valor de los parámetros del controlador serán mostrados en una interfaz HMI por la cual se podrá visualizar la respuesta del sistema a diferentes valores de entrada en tiempo real y, además, modificar parámetros del controlador.

## Planteamiento del Problema

En procesos industriales, la implementación de controladores PID supone un problema de optimización al comportamiento de estos, cada sistema tiene características y requerimientos diferentes por lo que la configuración de los parámetros que definen la acción de un control PID es necesaria para lograr los objetivos planteados para un sistema.

Se ofrecen comúnmente controladores PID con la función de autoajuste de sus parámetros de control, sin embargo, estos parámetros autoajustados no siempre cumplen con los requisitos del sistema o los cumplen de forma parcial, por lo que un diseño orientado al sistema a controlar basado en sus características físicas y el comportamiento de los elementos de control genera una sintonización apropiada que cumple con los requisitos impuestos a un sistema.

El sistema por controlar se compone de un pistón neumático con vástago de doble efecto, al cual se conectarán a sus entradas una válvula proporcional neumática la cual tendrá la función de controlar la posición del émbolo del pistón. La variable posición será medida mediante un potenciómetro lineal el cual será acoplado al vástago del pistón y energizado con una fuente de voltaje con el fin de medir sus propiedades eléctricas y así, obtener indirectamente el valor de la posición del émbolo.

Para la adquisición de datos y control de los componentes electroneumáticos se empleará un PLC el cual tendrá embebido una rutina de control PID de forma que el valor de la posición del émbolo se regule automáticamente a una referencia. Se realizará la sintonización de los parámetros del PID de forma que se obtengan respuestas con mayor velocidad, menor sobrepaso, menor choque entre piezas mecánicas (golpe de ariete), mayor estabilidad y robustez al añadir una carga al pistón.

Se requiere desarrollar una interfaz HMI la cual constará de una pantalla conectada al PLC que mostrará el estado del equipo y permitirá configurar diversos parámetros del sistema,

a esta HMI se añadirá un manual de usuario en el cual se detallará el funcionamiento del sistema y el uso de la interfaz.

### **Justificación e importancia**

En el Laboratorio de Fluidos, se encuentra la sección de Neumática e Hidráulica, donde se realizan actividades de docencia, con la generación de circuitos con el fin ejemplificar aplicaciones industriales, en este laboratorio los estudiantes adquieren conocimiento de sistemas neumáticos e hidráulicos mediante la implementación de sistemas enfocados a la resolución de problemas. En el ámbito industrial, la automatización de procesos permite reducir la intervención humana necesaria para llevar a cabo una tarea. Al emplear soluciones tecnológicas, es factible reemplazar las labores manuales por procesos automatizados con mayor seguridad, eficiencia y calidad.

En el Ecuador los procesos industriales se encuentran en una etapa de modernización en la cual según (Bejarano, 2022) “A los procesos mayormente manuales, mecánicos y eléctricos se están sumando capacidades de control que ofrecen las nuevas tecnologías”, por ello, las técnicas de automatización industrial deben ser motivo de investigación en la academia, con el fin de optimizar los procesos y mantener a la industria nacional a la par con otros países desarrollados.

Los alumnos de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE con dominio en sistemas neumáticos, eléctricos y de control, ponen en práctica el conocimiento teórico adquirido durante su preparación en el diseño e implementación de un sistema con PLC para el control de la posición de un actuador lineal neumático, el mismo servirá para el estudio y desarrollo de la neumática industrial dentro de la Universidad.

El proyecto consiste en la elaboración de un sistema de control en lazo cerrado al posicionamiento de un actuador neumático lineal (PID) para ello se empleará una válvula proporcional direccional la cual junto a los demás elementos de control y manipulación del



sistema serán montados en una pequeña estación tipo escritorio con el fin de permitir la visualización y manipulación del sistema por parte de docentes y estudiantes en el laboratorio de Neumática e Hidráulica.

El desarrollo de este proyecto reforzará los conocimientos de los estudiantes en las diferentes materias cursadas a lo largo de su aprendizaje y pondrá en práctica todo el conocimiento teórico y práctico obtenido en sistemas mecánicos, neumáticos, de control, instrumentación y programación, además, servirá de base para futuros trabajos en las diferentes áreas de aplicación de la ingeniería mecatrónica donde se empleen sistemas neumáticos con un control en lazo cerrado.

Ya que el proyecto será implementado en y para la Universidad, servirá de objeto de estudio a los sistemas neumáticos y procesos de control. En la actualidad, dentro del laboratorio de neumática e hidráulica, no existe un sistema de lazo cerrado que permita el control de la posición de un actuador neumático, por lo cual, la realización de este proyecto beneficia a los futuros estudiantes que hagan uso de este y poner en práctica conocimientos teóricos del área de control, así como de sistemas neumáticos. A su vez, creará pautas para el desarrollo e investigación de dichos sistemas, con el objetivo de mejorar sus características y explorar sus aplicaciones industriales.

## **Objetivos**

### ***Objetivo 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.

### ***Objetivos 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.

## Alcance

Este proyecto trata del diseño e implementación de un sistema de control neumático en bucle cerrado con PLC y control PID a la posición de un actuador neumático lineal, en la Figura 1 se muestran las 3 partes principales del sistema: Planta, Control y Visualización.

## Figura 1

*Partes principales del sistema: Planta, Control y Visualización.*

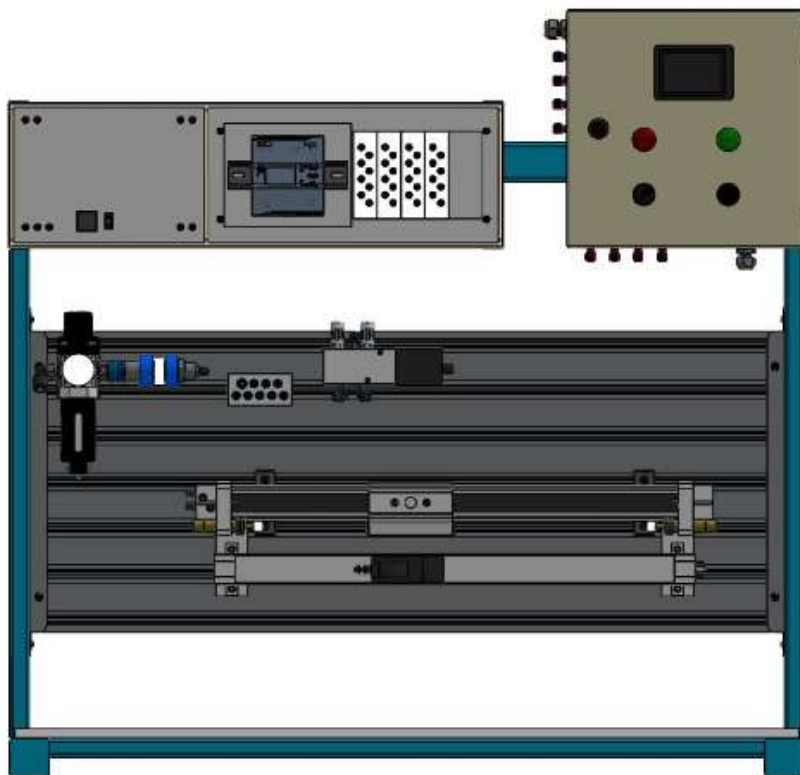


El pistón neumático será comandado por una válvula proporcional direccional neumática, la adquisición de la variable de posición se hará mediante un potenciómetro lineal que será montado junto al actuador lineal y permitirá la medición, la cual será enviada al PLC,

el sistema será controlado a través de una interfaz humano-máquina la cual se realizará por medio de una placa Raspberry PI 3B+ y una pantalla conectada a ella, la misma se encargará del envío de datos al PLC usando UDP como protocolo de comunicación, esta interfaz permitirá la manipulación de la posición deseada y presentará los datos necesarios para el uso del sistema, además, permitirá la modificación de los parámetros de control con el fin de servir como herramienta didáctica para el aprendizaje del efecto de la variación de dichos parámetros. Los elementos que conforman el sistema serán montados en una estación diseñada y construida en la Universidad con el fin de proporcionar un espacio adecuado para el uso de este proyecto de forma similar a la mostrada en la Figura 2.

## Figura 2

*Estación Diseñada para el Proyecto.*



El proyecto se centra en la optimización del comportamiento del actuador neumático lineal, se busca el sistema tenga: un corto tiempo de respuesta, alta precisión, una buena respuesta a perturbaciones y finalmente una interfaz y diseño agradable para el usuario.

El sistema será sometido a varias pruebas con el fin de examinar su comportamiento, entre ellas están pruebas de velocidad de respuesta, pruebas de precisión, pruebas de repetitividad, pruebas con carga, etc. En dichas pruebas se examinarán parámetros como el tiempo de respuesta, error de posición, sobrepaso, golpes, vibraciones etc., mismos que permitirán juzgar su rendimiento.

## Capítulo II

### Fundamentos teóricos

En este capítulo se revisan los conocimientos empleados para el desarrollo de este proyecto y necesarios para el entendimiento de este documento.

#### Error

Gutiérrez (2017) menciona que el error de medida “Es la diferencia entre un valor real y un valor ideal” (p. 3).

Se calcula como se muestra en la ecuación (1).

$$\text{Error} = \text{Valor medido} - \text{Valor de referencia} \quad (1)$$

#### Exactitud

Es medida en que un valor señalado se ajusta a un valor estándar o valor ideal, esto representa el nivel de concordancia. La concordancia en un sistema, por su parte, se refiere a la máxima diferencia entre la curva de calibración de un instrumento y una curva característica predeterminada (Creus, 2011).

Por ende, el concepto de exactitud se define por la cualidad de un experimento de arrojar valores muy cercanos al valor verdadero o real de la magnitud que se desea medir (Creus, 2011).

#### Precisión

Es la característica de un instrumento mediante la cual tiende a proporcionar lecturas cercanas entre sí, es decir, el nivel de separación entre estas lecturas (Creus, 2011).

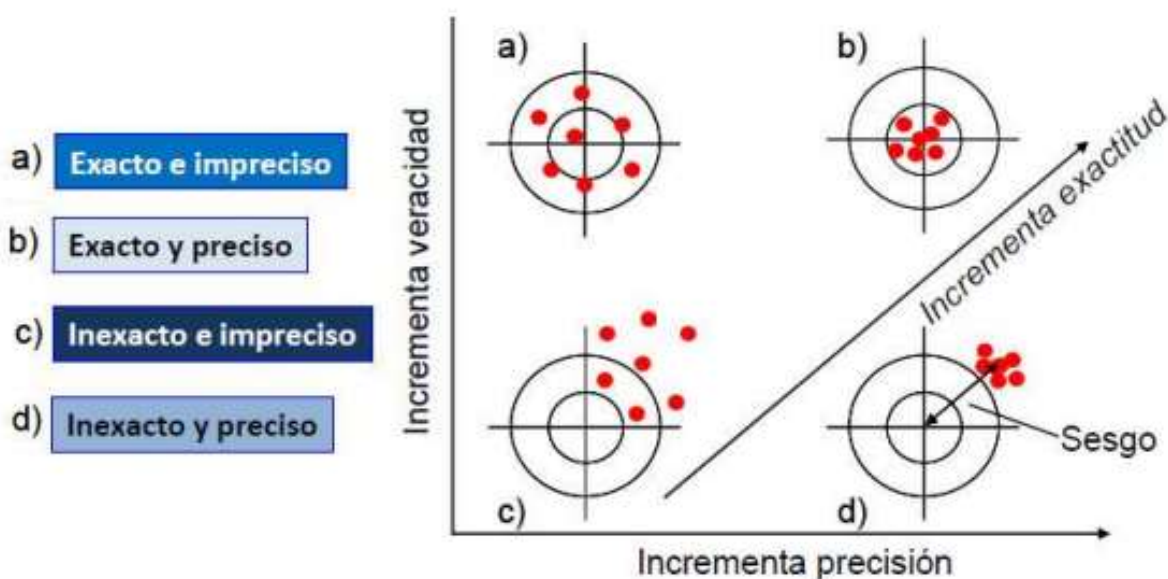
Es posible comparar las definiciones de exactitud y precisión considerando que la exactitud en un experimento está ligada a los valores registrados de la medida en relación con

el valor real de la variable, mientras que la precisión se basa exclusivamente en los valores obtenidos durante la medición en el experimento. (Creus, 2011).

En la Figura 3 se muestran los diferentes efectos de la variación de exactitud y precisión en la toma de una medida en un experimento.

### Figura 3

*Efectos de la variación de la exactitud y precisión en las respuestas de un experimento.*



*Nota.* Tomado de *Modelado y Control de Posición de un Cilindro de Doble Efecto Utilizando PID y PID-Difuso con Matlab y Labview* (p. 25), por A. Orellana y J. Cascante, 2017, Universidad Politécnica Salesiana.

### Zona muerta

Según Creus (2011) la zona muerta "Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce una respuesta" (p. 34).

Existen sistemas con respuestas aproximables a un comportamiento lineal en las cuales la existencia de una zona muerta introduce no linealidades al sistema. (Kara & Eker, 2004).

## Sensibilidad

Corresponde a la proporción entre el aumento en la señal de salida o lectura y el aumento en la variable que provoca dicho cambio (señal de entrada), una vez que se ha llegado al estado de equilibrio (Creus, 2011).

## Repetibilidad

La repetibilidad se refiere a la habilidad de un sistema para proporcionar idénticos resultados al llevar a cabo diversas mediciones en condiciones idénticas. Este atributo está estrechamente relacionado con la precisión, ya que implica la evaluación de las disparidades entre los valores derivados de distintas mediciones (Creus, 2011).

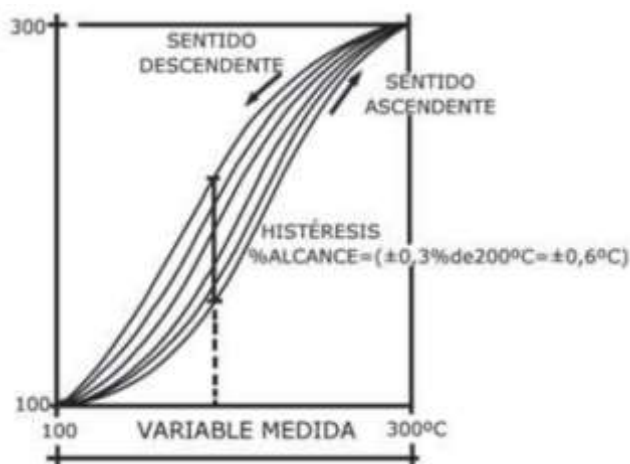
## Histéresis

Es el valor máximo de discrepancia observado en las indicaciones de la señal de salida para cualquier valor dentro del rango de medición, cuando la variable atraviesa toda la escala en ambas direcciones, tanto ascendente como descendente (Creus, 2011).

En la Figura 4 se muestra con un ejemplo el concepto de histéresis:

### Figura 4

*Curva de histéresis de un termómetro.*



*Nota.* En el gráfico se representan los valores de temperatura tomados de un termómetro de 0-100%, para el valor de la variable de 40 °C, la aguja marca 39,9 °C al subir la temperatura desde 0 °C, e indica 40,1 °C al bajar la temperatura desde 100 °C. Tomado de *Instrumentación Industrial* (p. 21), por A. Creus, 2011, Marcombo.

### **Resolución**

“Es la menor diferencia de valor que un instrumento puede distinguir” (Creus, 2011, p. 36). Esta resolución puede tratarse de un valor tanto para la entrada de un sensor como para la salida de un actuador (Creus, 2011).

### **Ruido**

Se refiere a cualquier alteración eléctrica no deseada o señal fortuita que causa cambios en la transmisión, indicación o registro de los datos previstos (Creus, 2011). El ruido proviene de fuentes externas o intrínsecas al sistema, sin embargo, algunos sistemas son más sensibles al ruido que otros.

### **Transformada de Laplace y función de transferencia**

La transformada de Laplace convierte una función “g(t)” del dominio tiempo, en tiempos mayores o iguales a cero, en una función “G(s)” propia del dominio “s” mediante la ecuación (2) (Hernández, 2010).

$$L\{g(t)\} = \int_0^{\infty} g(t)e^{-st}dt = G(s) \quad (2)$$

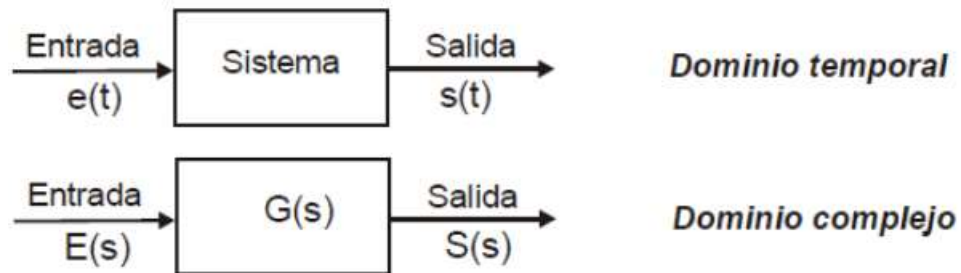
De tal forma, se dice que “G(s)” es la transformada de Laplace de la función “g(t)”. El factor “s” es un número complejo.

Una función de transferencia es aquella que relaciona una señal de entrada con una señal de salida, este comportamiento se muestra en la Figura 5.



## Figura 5

*Función de transferencia de un sistema.*



*Nota.* Tomado de *Sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de control y automatización de la FICM* (p. 33), por L. Caiza, Universidad Técnica de Ambato.

## Estabilidad en sistemas de control

La estabilidad de un sistema es una característica que se atribuye a un sistema cuando su respuesta no tiende al infinito, en otras palabras, se cumple la ecuación (3) (Hernández, 2010):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) \neq \infty \quad (3)$$

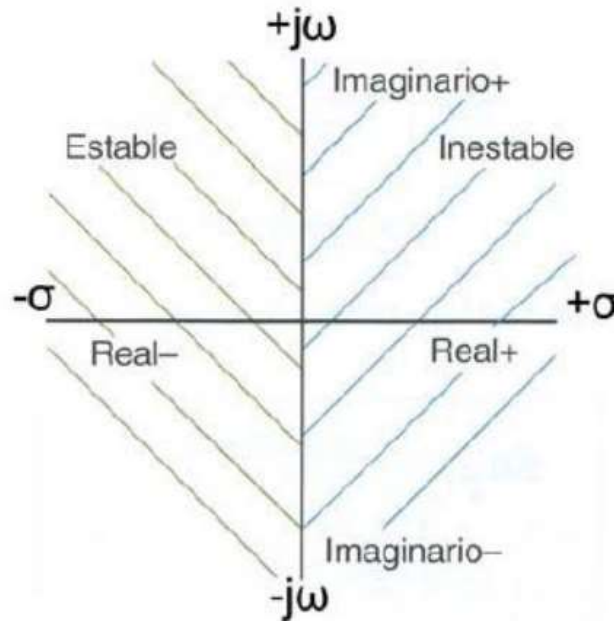
Para analizar la estabilidad de un sistema se emplean sus polos y ceros; si “D(s)” corresponde al vector del denominador de una función de transferencia “G(s)” y “N(s)” el numerador, se cumple la ecuación (4).

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4)$$

Las soluciones para “s” obtenidas al igualar “N(s)” y “D(s)” a cero representan a los Ceros y Polos respectivamente, si se grafican en el plano imaginario los polos de una función de transferencia determinada se puede conocer su estabilidad en base al criterio mostrado en la Figura 6.

**Figura 6**

*Criterio para determinar la estabilidad de un sistema.*



*Nota.* Tomado de *Sistemas de control de lazo abierto y cerrado de voltaje para determinar el error en estado estable a diferentes pulsos de entrada en el laboratorio de control y automatización de la FICM* (p. 37), por L. Caiza, Universidad Técnica de Ambato.

Las respuestas continuas o constantes que se consideran inestables se obtienen cuando los polos están ubicados en el origen o sobre el eje imaginario. Por otro lado, si los polos se encuentran en la parte derecha del plano complejo, las respuestas crecen con el tiempo y también se consideran inestables (Hernández, 2010).

El concepto de estabilidad se puede visualizar en el dominio “s”. Un sistema será estable siempre que todos sus polos estén a la izquierda del eje “jω”, o si existe un polo simple en el origen. Cualquier otra combinación de polos hará que el sistema sea inestable (Hernández, 2010).

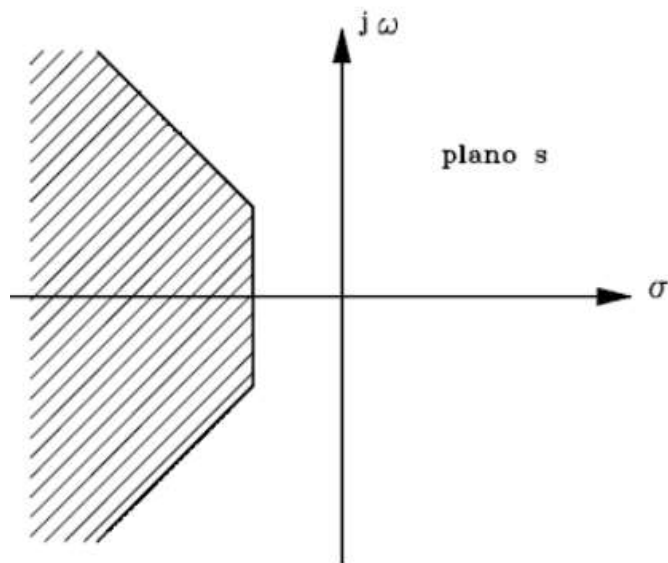
Un sistema es inestable cuando al menos un polo se encuentre a la derecha del eje “jω”, polos complejos repetidos dos o más veces en el eje “jω”, o dos o más polos en el origen (Hernández, 2010).

Es importante, además, analizar al polo más cercano al eje " $j\omega$ ", el cual es denominado polo dominante ya que es aquel que tiene mayor efecto sobre el sistema, ya que, su posición determina directamente la velocidad de respuesta del sistema de forma que, cuanto más cerca esté el polo dominante del eje " $j\omega$ ", más lento será el sistema, y cuanto más alejado hacia la izquierda del eje " $j\omega$ " se encuentre el polo dominante, más rápido será el sistema (Caiza, 2015).

Para la obtención de una respuesta rápida y bastante amortiguada, los polos deben ubicarse en una zona como la presentada en la Figura 7 (Giraldo, 1997).

### Figura 7

*Zona recomendada para la ubicación de polos.*


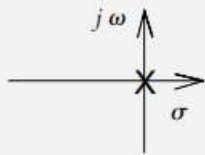
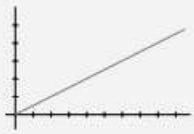
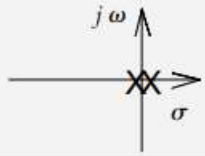
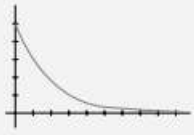
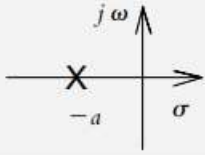
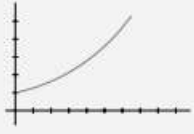
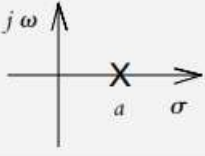

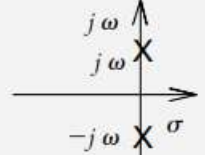

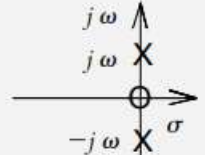


*Nota.* Tomado de teoría de Control (p. 188), por D. Giraldo e I. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

En la Figura 8 se muestra una tabla con diferentes funciones de transferencia y la gráfica en el plano imaginario de sus polos.

Figura 8

Diagrama de polos y ceros para diferentes funciones de transferencia  $G(s)$ .

$g(t)$	Gráfica en tiempo	$G(s)$	Gráfica en el plano $s$
1. $A$		$\frac{A}{s}$	
2. $A t$		$\frac{A}{s^2}$	
3. $A e^{-at}$		$\frac{A}{s+a}$	
4. $A e^{at}$		$\frac{A}{s-a}$	
5. $A \sin \omega t$		$A \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	
6. $A \cos \omega t$		$A \frac{s}{s^2 + \omega^2}$	

Nota. Tomado de *Introducción a los Sistemas de control* (p. 43), por R. Hernández, 2010, Pearson.

## Orden de sistemas

Se clasifican para los sistemas de acuerdo con su orden debido a la forma de su función de transferencia. Se clasifican en:

**Sistema de orden cero.** La función de transferencia no posee ningún polo.

**Sistema de primer orden.** La función de transferencia posee un polo.

**Sistema de segundo orden.** La función de transferencia posee dos polos.

**Sistema de orden superior.** La función de transferencia posee más de dos polos (Doebelin, 1993).

## Linealidad y no-linealidad

Linealidad es la especificación de un instrumento relacionada al grado con el que la gráfica de calibración se ajusta al comportamiento descrito por una línea recta obtenida de mínimos cuadrados. La linealidad es el valor que representa la separación de la gráfica de calibración de dicha línea recta (Doebelin, 1993).

Se dice que un instrumento es no lineal o presenta una no-linealidad cuando su gráfica de comportamiento (parcial o completamente) se aleja de la línea recta anteriormente mencionada, este comportamiento puede tener un impacto significativo en la respuesta dinámica de un dispositivo, especialmente al ocasionar cambios significativos en el rendimiento con variaciones en la carga de salida o en el tamaño de la señal de entrada.

Algunos tipos comunes de no linealidad incluyen el punto muerto, la fricción, la histéresis, la limitación de la velocidad, la saturación, las respuestas exponenciales y las características de las válvulas. Estas no linealidades no solo generan distorsión en la forma de la señal, sino que también pueden resultar en un desplazamiento de fase y una atenuación adicional (Instrument Society of America, 1966).

### Error de estado estable

El error de estado estable es la diferencia entre el valor de la señal de referencia y el valor de la respuesta del sistema en el estado estable (Hernández, 2010).

Cabe mencionar que el error de estado estable está en relación directa con la resolución del instrumento que se emplee.

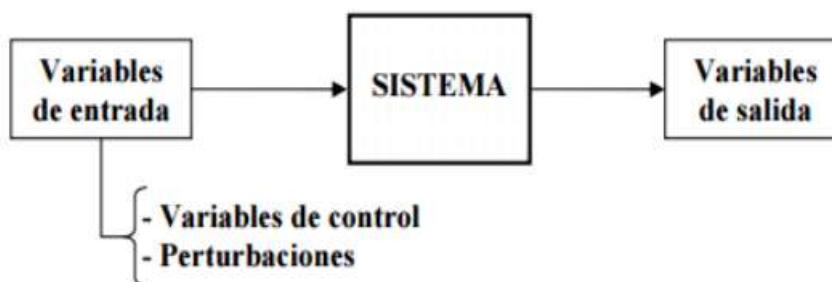
### Sistema de control

Un sistema de control consiste en la combinación de elementos y procedimientos interconectados, llamados plantas, que colaboran de manera conjunta para supervisar las salidas de dichos procedimientos. En una explicación más sencilla, un sistema de control produce una reacción o resultado basado en una entrada o estímulo particular. (Norman, 2004).

Un sistema de control se caracteriza por tener ciertos elementos que influyen sobre el funcionamiento del sistema, el esquema general de un sistema de control se muestra en la Figura 9.

#### Figura 9

*Esquema general de un sistema de control.*



*Nota.* Tomado de *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (p. 104), por S. Gutiérrez y M. Iturralde, 2017, Universidad Estatal península de Santa Elena.

El objetivo de un sistema de control es conseguir el control de las variables de salida mediante la manipulación o dominio de las variables de entrada y variables de control, de tal forma que las variables de salida alcancen valores deseados (Gutiérrez e Iturralde, 2017).

Las principales ventajas de la implementación de un sistema de control a un sistema o proceso son:

- Encargarse de la estabilidad del sistema, rechazo a perturbaciones y errores en el modelo del sistema.
- Ser tan eficiente de acuerdo con el criterio establecido.
- Ser realizable en tiempo real con el uso de un computador (Gutiérrez e Iturralde, 2017).

### ***Elementos en un sistema de control***

Según Gutiérrez e Iturralde (2017) los elementos básicos que componen un sistema de control y permiten la manipulación del sistema son:

**Sensores.** Permiten medir los valores de las variables involucradas en el sistema.

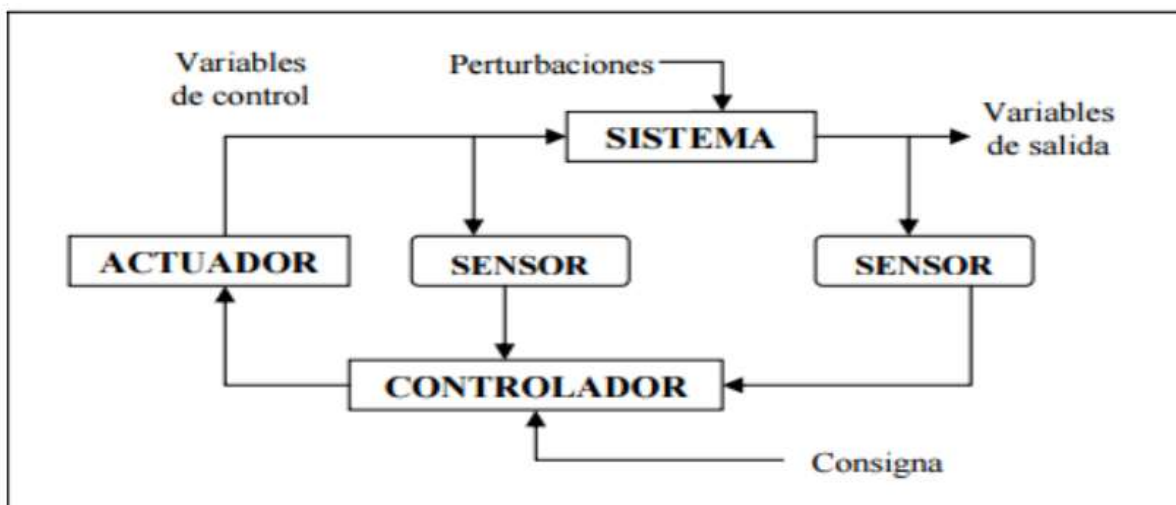
**Controlador.** Es un dispositivo que, de acuerdo con las variables de entrada al sistema, calcula la acción que se debe ejecutar para lograr modificar las variables de control.

**Actuador.** Es el mecanismo que realiza la acción designada por el controlador y modifica las variables de control del sistema (p. 106).

En la Figura 10 se muestran los elementos y su ubicación en un sistema de control.

**Figura 10**

*Estructura de un sistema de control.*



*Nota.* Tomado de *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (p. 106), por S. Gutiérrez y M. Iturralde, 2017, Universidad Estatal península de Santa Elena.

### **Estrategias de control**

La estrategia de control alude a la relación existente entre las variables medidas y las variables de control. Por ello existen dos tipos de estrategias en función de la relación mencionada y permiten calcular la acción de control del sistema, entre ellos se encuentran los sistemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado.

#### ***Sistemas de control de lazo abierto***

Son sistemas en los cuales la acción de control no se ve influenciada por la salida. En términos simples, en un sistema de control de lazo abierto no se evalúa la salida ni se retroalimenta para su comparación con la entrada (Ogata, 1998).

Las características de un sistema de control en lazo abierto son:

- No se contrasta la salida del sistema con el valor deseado.
- Para cada entrada de referencia, se asigna una condición de operación invariable.

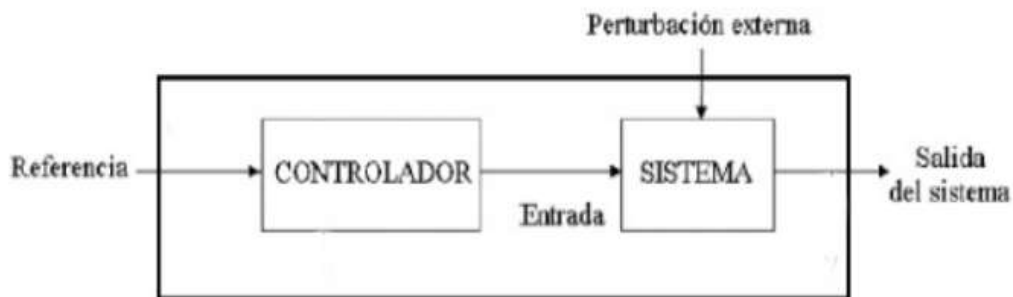


- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- No pueden autorregularse (Gutiérrez e Iturralde, 2017).

En la Figura 11 se muestra la estructura de un sistema en lazo abierto:

**Figura 11**

*Sistema de control en lazo abierto.*



*Nota.* Tomado de *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (p. 108), por S. Gutiérrez y M. Iturralde, 2017, Universidad Estatal península de Santa Elena.

Las ventajas y desventajas de un sistema de control en lazo abierto son:

**Ventajas.** Sencilla construcción y mantenimiento directo, coste inferior en comparación con sistemas en lazo cerrado correspondientes, ausencia de problemas de estabilidad, adecuados cuando medir la salida con precisión es difícil o económicamente inviable (Ogata, 1998).

**Desventajas.** Perturbaciones y variaciones en la calibración provocan desviaciones, lo que puede resultar en una salida diferente a la deseada, para mantener la calidad requerida en la salida, se requiere recalibración periódica (Ogata, 1998).

### **Sistemas de control en lazo cerrado**

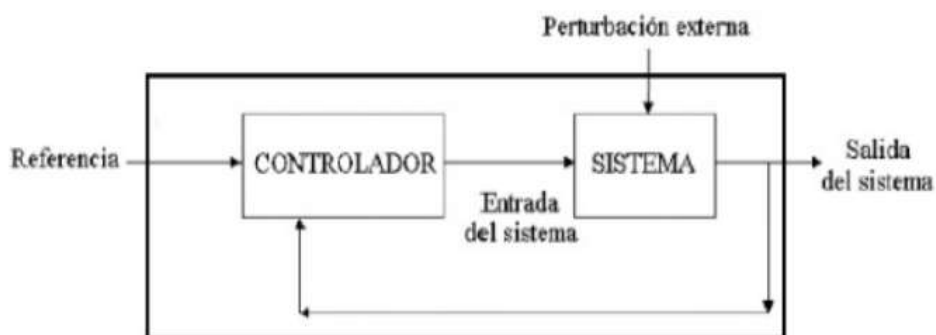
Los sistemas de control que integran retroalimentación también se denominan sistemas de control en circuito cerrado. En un sistema de control en circuito cerrado, el controlador recibe la señal de error de operación, que refleja la disparidad entre la señal de entrada y la

señal de retroalimentación (puede ser la propia señal de salida o una función que involucre la señal de salida junto con sus derivadas e integrales). La finalidad es reducir el error y llevar la salida hacia un valor deseado. (Ogata, 1998).

En la Figura 12 se muestra la estructura de un sistema en lazo cerrado:

### Figura 12

*Sistema de control en lazo cerrado.*



*Nota.* Tomado de *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (p. 108), por S. Gutiérrez y M. Iturralde, 2017, Universidad Estatal península de Santa Elena.

Gutiérrez e Iturralde clasifican un sistema de control en lazo cerrado en:

**Manuales.** Cuando la acción de control es realizada por un humano (operador).

**Automático.** Se hace uso de un controlador o dispositivo electrónico para el control de actuadores presentes en el sistema de control.

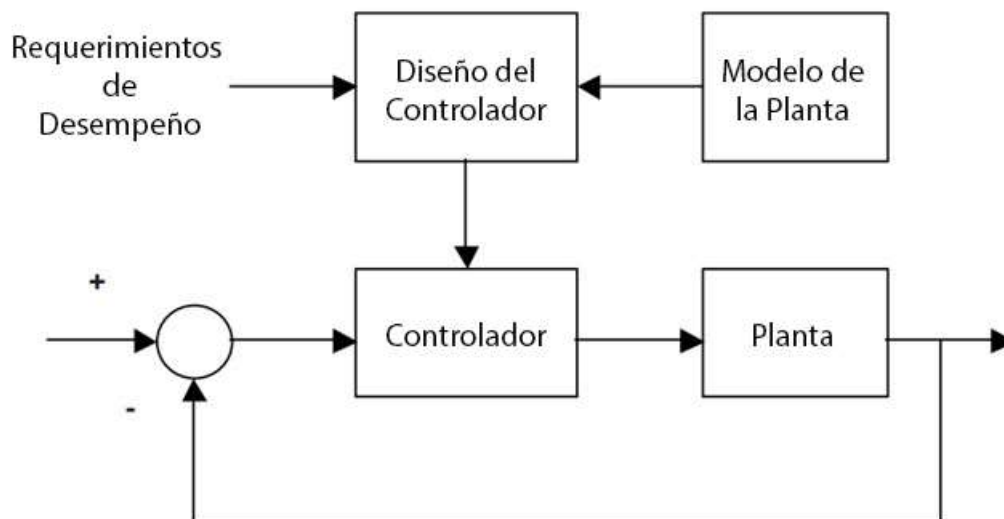
### Identificación de sistemas

Según Landau y Zito (2006) se entiende por identificación, “La determinación del modelo de un sistema dinámico a partir de las mediciones de entrada/salida. El conocimiento del modelo es necesario para el diseño y la implementación de un sistema de control de alto rendimiento” (p. 221).

En la Figura 13 se muestra el principio del diseño de controladores, nótese que para esta metodología se emplea el conocimiento de la planta o sistema.

### Figura 13

*Principios de diseño de un controlador.*



*Nota.* Adaptado de *Digital Control Systems* (p. 202), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer.

Los modelos de control dinámico, que describen la relación entre las variaciones de entrada y salida de un sistema, determinan el tipo de modelo apropiado para el diseño y ajuste de sistemas de control.

Según Landau y Zito (2006) existen dos modelos dinámicos, entre ellos:

**Modelos no paramétricos.** Se adquieren mediante el análisis de la respuesta en frecuencia y la respuesta al escalón.

**Modelos paramétricos.** Se adquieren por medio de modelos matemáticos como las funciones de transferencia (p. 222).

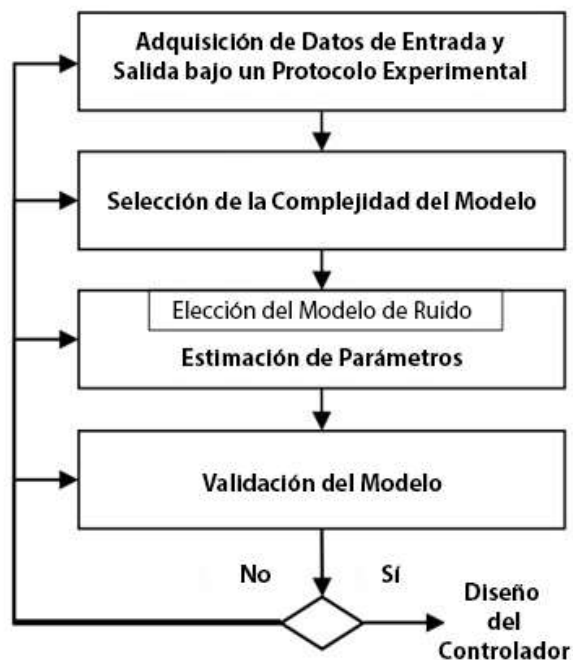
En la Figura 14 se muestra el diagrama de flujo de la metodología a seguir en el proceso de identificación del modelo de una planta o sistema.

Ya que en este proceso la metodología del experimento y la selección de la complejidad del modelo tienen una gran incidencia en los resultados obtenidos en la validación del modelo,

se genera la necesidad de iterarlo hasta conseguir un modelo que logre satisfacer los requerimientos impuestos.

### Figura 14

*Metodología de identificación de sistemas.*



*Nota.* Adaptado de *Digital Control Systems* (p. 204), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer.

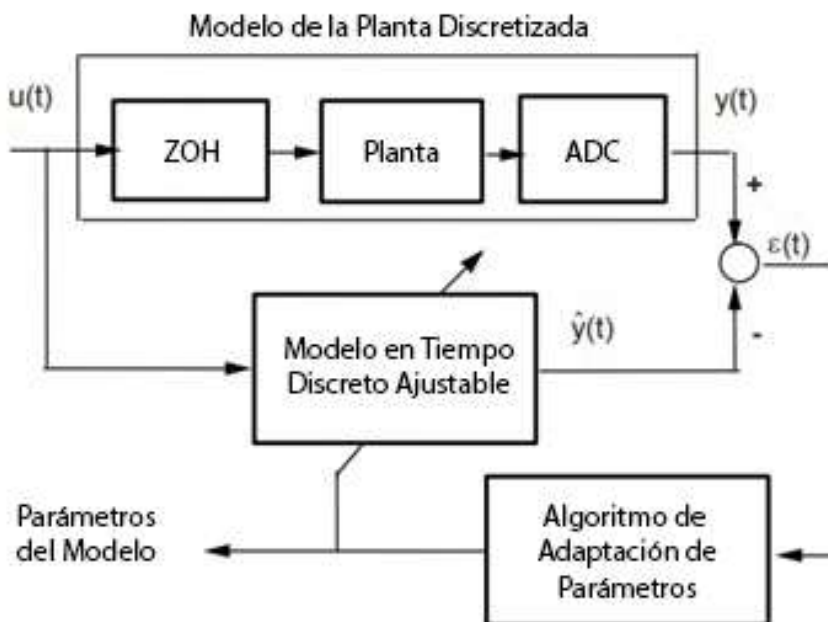
### **Algoritmo de adaptación de parámetros.**

El uso de herramientas computacionales permite la implementación de algoritmos que estiman de forma automática los parámetros de modelos en tiempo discreto. Estos algoritmos permiten la obtención de modelos paramétricos con mayor precisión que los métodos clásicos, además, pueden emplear señales de excitación muy bajas (Landau & Zito, 2006).

Los modelos adaptativos con mayor desempeño emplean una formulación recursiva como la que se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Modelo adaptativo de estimación de parámetros.



Nota. "ZOH" representa un retenedor de orden cero, ADC representa un convertidor análogo-digital. Adaptado de *Digital Control Systems* (p. 206), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer.

En el modelo mostrado, un set de datos " $u(t)$ " es aplicado a la planta para posteriormente obtener su respuesta " $y(t)$ " a dicha excitación, de la misma forma, un modelo discreto (modelo de predicción) con parámetros ajustables se somete a la misma excitación y su respuesta " $\hat{y}(t)$ " se le llama predicción, la diferencia entre la respuesta de la planta discretizada y la predicción se conoce como error de predicción " $\varepsilon(t)$ ", este valor será usado por el algoritmo de adaptación una vez por cada muestra obtenida modificando los parámetros del modelo de predicción, con el fin de minimizar el error de predicción en base a un criterio seleccionado.

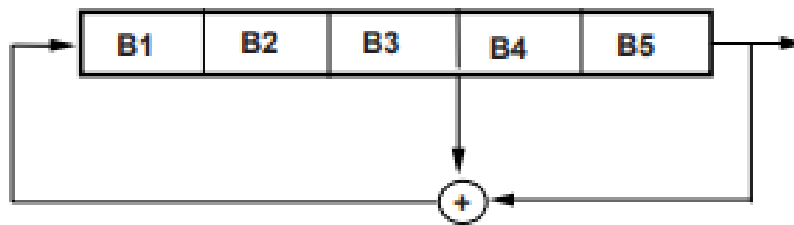
### Pseudo-random binary sequences (PRBS)

Pseudo-Random Binary Sequences (secuencia pseudo-random binaria en español), son secuencias de pulsos rectangulares con modulación de ancho de banda, los cuales simulan un ruido blanco en tiempo discreto y por lo tanto tiene un espectro amplio de frecuencias.

Su apelativo de "pseudoaleatorio" se deriva de su rasgo característico: poseer una longitud de secuencia en la cual las alteraciones en el ancho del pulso varían de manera aleatoria, aunque eventualmente se vuelven periódicas después de un cierto lapso, y este periodo se establece en función de la extensión de la secuencia. Un método común de generación de PRBS se muestra en la Figura 16:

#### Figura 16

*Generación de un PRBS de longitud 31*



*Nota.* Registros de desplazamiento con realimentación son usados. La longitud máxima de una secuencia es  $2^N - 1$  en la que "N" es el número de celdas del registro de desplazamiento, la Figura presenta la generación de un PRBS de longitud  $31 = 2^5 - 1$  obtenido mediante un desplazamiento de cinco celdas registro. Tomado de *Digital Control Systems* (p. 250), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer

#### **Uso de PRBS para la identificación de un sistema.**

Un PRBS es comúnmente empleado en la identificación de sistemas por las ventajas que este ofrece como: replicabilidad de la señal, aleatoriedad de los pulsos y rango de frecuencia que cubre.

Para emplear un PRBS se deben tomar las siguientes consideraciones:

- El tiempo de pulso máximo es igual a  $NT_s$ , siendo “ $T_s$ ” el tiempo de muestreo del PRBS.
- Para cubrir el espectro completo de frecuencias, la duración del experimento debe no ser menor a la longitud completa de la señal PRBS generada, por lo tanto, si “ $L$ ” es la duración del experimento se recomienda cumplir la inecuación (5):

$$2^{N-1}T_s < L \quad (5)$$

- La magnitud de una señal PRBS debe ser mayor a la de cualquier ruido residual que pueda producirse en el sistema (Landau & Zito, 2006).

### Tipos de control

Giraldo y Tabares (1997), proponen la siguiente clasificación de tipos de control:

**Control adaptativo.** Se enfoca en la identificación de la planta para ajustar de manera eficaz los parámetros de control, lo que posibilita la adaptación a modificaciones tanto internas como externas en la naturaleza de la planta.

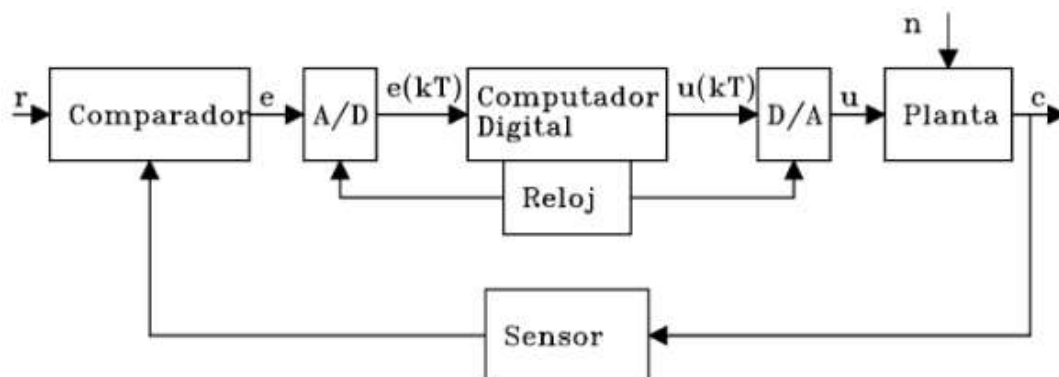
**Control óptimo.** Se emplea con el propósito de optimizar variables, ya sea maximizando o minimizando aspectos como el consumo de energía, el tiempo, entre otros.

**Control digital.** El control digital se implementa comúnmente mediante un microprocesador que desempeña la función de controlador, conocido como computadora digital. (p. 9).

En la Figura 17 se observa la topología del control digital.

Figura 17

Topología de un Control Digital.



Nota. Tomado de *Teoría de Control* (p. 9), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

### Controladores digitales

En el pasado, el control solía ser llevado a cabo manualmente por un operario, quien realizaba ajustes necesarios en el sistema de acuerdo con requisitos predefinidos. En la actualidad, los sistemas de control son la base esencial de una amplia gama de aplicaciones, y aunque hay diversos tipos de control, el control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) es el más ampliamente utilizado en la industria de procesos automatizados, con una adopción de alrededor del 95%, en sus variantes P, I, PI, PD y PID (Ogata, 1998).

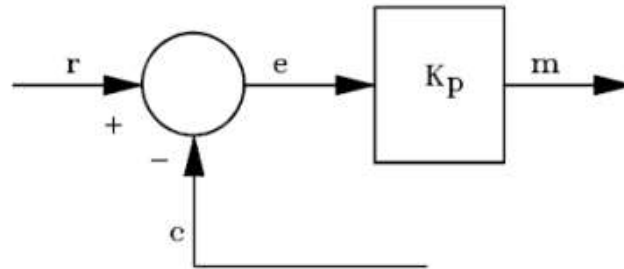
#### **Control proporcional (P)**

En un controlador proporcional " $m(t)$ " es proporcional  $u$  obtenido al multiplicar por una constante a la señal de error " $e(t)$ ", el esquema de un control proporcional se muestra en la Figura 18.



## Figura 18

Diagrama de bloques control proporcional.



Nota. Tomado de *Teoría de Control* (p. 151), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

Donde:

r: Señal de referencia.

e: Señal de Error.

m: Salida del controlador.

c: Señal de salida.

$k_p$ : Acción proporcional.

En este regulador, la variable controlada exhibe un error en estado estable que se mantiene constantemente. Para corregir este error, se utiliza una acción de integración. (Giraldo y Tabares, 1997).

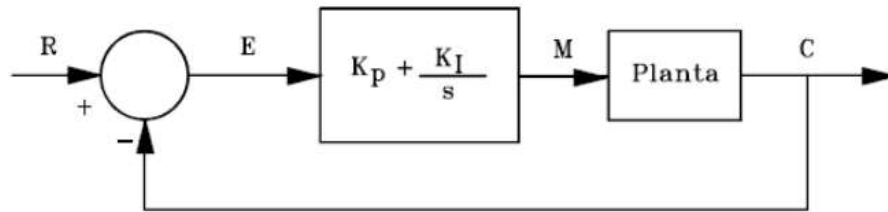
### **Control proporcional-integral (PI)**

Este controlador en particular se emplea en una amplia variedad de procesos debido a su naturaleza complementaria, ya que la acción proporcional entra en juego de manera inmediata, mientras que la acción integral se ejecuta en un lapso temporal. Gracias a esta segunda acción de control, se elimina el error en estado estable que persiste en la acción proporcional (Giraldo y Tabares, 1997).

En la Figura 19 se muestra el esquema de un control proporcional-integral.

### Figura 19

Diagrama de bloques de un control proporcional-integral.



Nota. Tomado de *Teoría de Control* (p. 158), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

Donde:

R: Señal de referencia.

E: Señal de Error.

M: Salida del controlador.

C: Señal de salida.

$K_p$ : Acción proporcional.

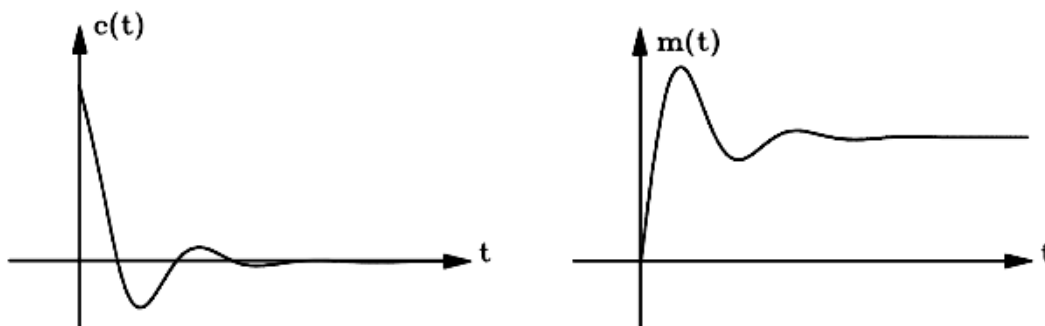
$\frac{K_I}{s}$ : Acción de reposición o acción integral.

El error se corrige de manera más veloz mediante " $K_p$ ". La acción de " $\frac{K_I}{s}$ " erradica por completo el error. Con este tipo de regulador, se logra una mejora en las condiciones de estabilidad en comparación con el control puramente proporcional o integral. (Giraldo y Tabares, 1997).

En la Figura 20 se muestran los efectos de la eliminación de estado estable debido a la acción Integral.

**Figura 20**

Señales de error y de control PI.



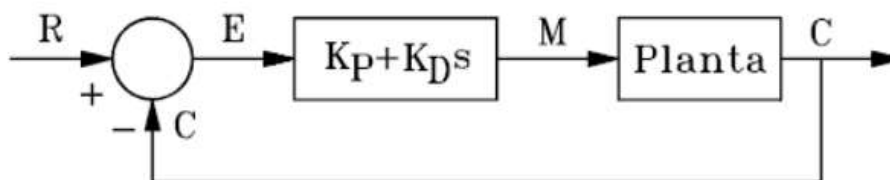
*Nota.* A la izquierda la señal de error (se vuelve cero en estado estable), a la derecha la señal de control (tiende a un valor en estado estable). Tomado de *Teoría de Control* (p. 156), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

### **Control proporcional-derivativo (PD)**

Al añadir un término derivativo a la acción proporcional se obtiene un sistema como el mostrado en la Figura 21, la acción derivativa anticipa cambios en el error y compensan dichos cambios impidiendo que el error crezca bruscamente.

**Figura 21**

Diagrama de bloques control Proporcional-Derivativo.



*Nota.* Tomado de *Teoría de Control* (p. 160), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

Donde:

R: Señal de referencia.

E: Señal de Error.

M: Salida del controlador.

C: Señal de salida.

$K_p$ : Control de acción proporcional.

$K_I s$ : Acción de crecimiento por unidad de tiempo

En un control PD la señal “ $m(t)$ ” aumenta en proporción al crecimiento del error “ $e(t)$ ”, si el error crece en gran medida, entonces la señal del controlador crece para aminorar el crecimiento del error de una forma anticipada (D. Giraldo y I. Tabares, 1997).

Es válido acotar que la acción derivativa puede llegar a amplificar ruidos que se introduzcan al sistema, característica que debe ser tomada en cuenta en algunos sistemas.

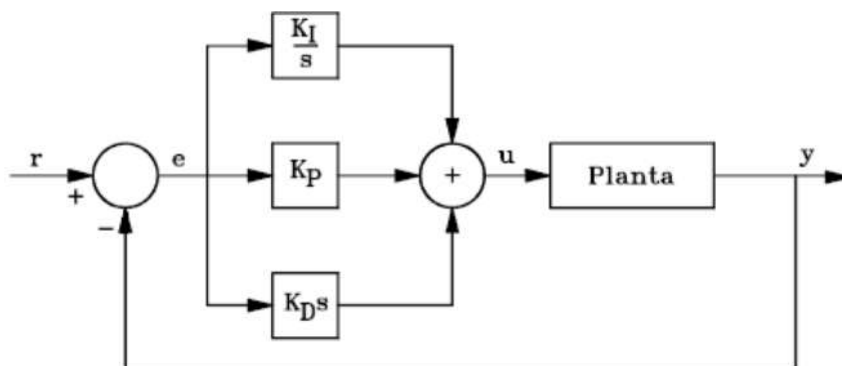
### **Control proporcional-integral-derivativo (PID)**

Un controlador PID reúne todas las características de las acciones proporcional, integral y derivativa lo que le otorga la capacidad de: alcanzar rápidamente su valor de estado estable, eliminar el error en estado estable y regular su salida ante cambios bruscos del error.

Una estructura clásica de un controlador PID se muestra en la Figura 22.

**Figura 22**

*Diagrama de bloques control Proporcional-Integrativo-Derivativo.*

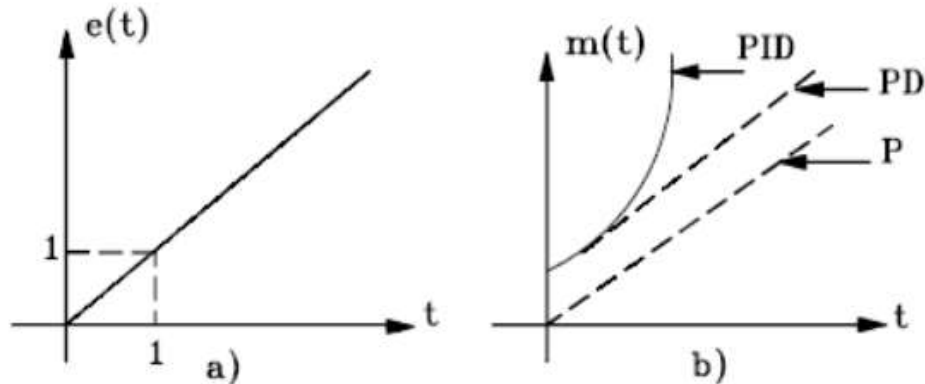


*Nota.* Esta estructura es comúnmente llamada PID en Paralelo. Tomado de *Teoría de Control* (p. 164), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

En la Figura 23 se hace una comparación entre diferentes respuestas de controladores P, PI, PD y PID para una señal de error con forma de rampa positiva.

### Figura 23

Señal control PID.



Nota. a) Señal de Error (rampa ascendente), b) Respuesta de diferentes controladores.

Tomado de *Teoría de Control* (p. 162), por B. Giraldo y B. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

La respuesta para un controlador P es proporcional al error, la respuesta para un controlador PD es un valor proporcional al error sumado un valor proporcional a la tasa de cambio del error (debido a la acción derivativa) y la respuesta de un controlador PID es la respuesta de un PD sumada una señal proporcional al error acumulado en el tiempo (debido a la acción integral).

### Sistemas en tiempo discreto

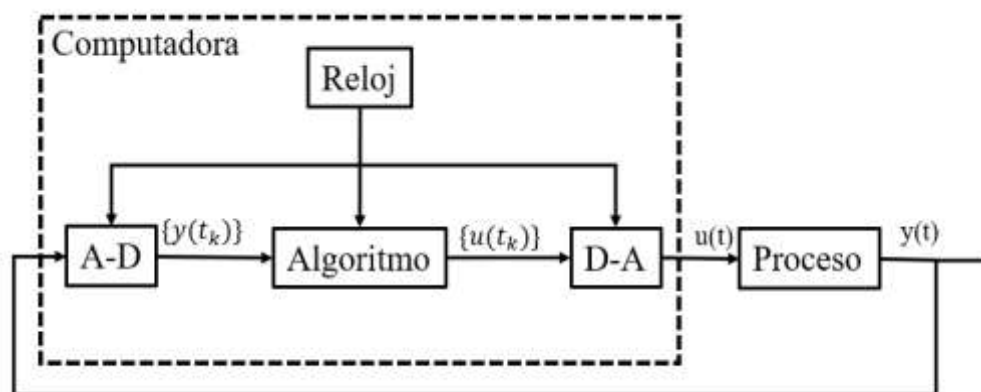
En el campo de control y procesamiento de señales se utilizan ampliamente sistemas en tiempo discreto, especialmente los sistemas digitales y computacionales. Estos sistemas procesan las señales a lo largo del tiempo en momentos específicos.

### **Muestreo de señales en tiempo continuo**

Según Astrom y Wittenmark (1997) el muestreo de señales “en el contexto del control y la comunicación, el muestreo significa que una señal de tiempo continuo se sustituye por una secuencia de números que representan los valores de la señal en determinados momentos” (p. 31), también mencionan que debido a la naturaleza discreta de las computadoras digitales, el muestreo es una característica esencial de los sistemas controlados como en el ejemplo que se muestra en la Figura 24.

#### **Figura 24**

*Diagrama esquemático de un sistema controlado por ordenador.*



*Nota.* La figura muestra el diagrama de un sistema o algoritmo ejecutado por un computador conectado a dos convertidores A-D y D-A. Adaptado de *Computer-Controller Systems* (p. 2), por K. Astrom y B. Wittenmark, 1997, Prentice Hall.

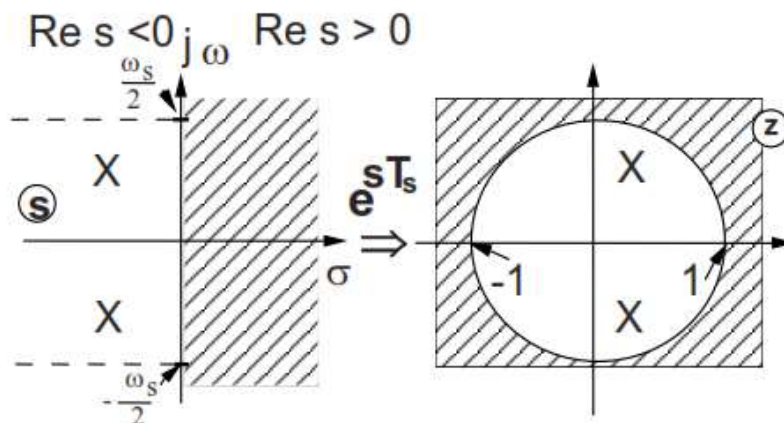
Para pasar un sistema de tiempo continuo a tiempo discreto se puede realizar el cambio de variable mostrado en la ecuación (6) (Landau y Zito, 2006).

$$z = e^{sT_s} \quad (6)$$

El cambio de variable representa la transformación de migrar del semiplano izquierdo del plano “s”, en el dominio del tiempo continuo al interior del círculo unitario centrado en el origen del plano “z” como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

Efecto de la transformación del cambio de variable.

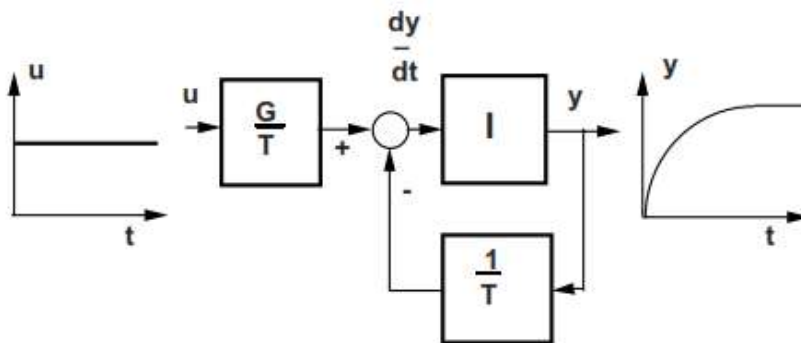


*Nota.* La figura muestra el efecto producido al migrar de tiempo continuo al tiempo discreto a través de un cambio de variable. Tomado de *Digital Control Systems* (p. 40), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer.

La Figura 26 muestra la respuesta de un sistema en tiempo continuo para una entrada escalón, la respuesta puede ser obtenida de un sistema de primer orden representado como un integrador con cierta ganancia de retroalimentación.

**Figura 26**

*Modelo de sistema en tiempo continuo.*



*Nota.* Tomado de *Digital Control Systems* (p. 34), por G. Landau y D. Zito, 2006, Springer.

Si al sistema representado en la Figura 26 se proporciona una entrada del dominio de la frecuencia descrita por la ecuación (7), según Landau y Zito (2006) se obtiene la ecuación (8), como función de transferencia del sistema.

$$u(t) = e^{sT_s k} \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{b_1 e^{-sT_s}}{1 + a_1 e^{-sT_s}} \quad (8)$$

Aplicando el cambio de variable descrito en la ecuación (7), se obtiene la transformación de la función de transferencia de tiempo continuo a tiempo discreto, descrita en la ecuación (9).

$$H(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (9)$$

Según Landau y Zito (2006) es necesario centrarse en un aspecto importante en los sistemas de segundo orden de tiempo continuo, descrito por la ecuación (10). El aspecto recomendado es que la frecuencia amortiguada resonante “ $\zeta$ ” es igual a la mitad de la frecuencia de muestreo, como se describe en la ecuación (11) y los polos conjugados del sistema se describen en la ecuación (12).

$$\frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0 s + s^2} \quad (\zeta < 1) \quad (10)$$

$$\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} = \frac{\omega_s}{2} \quad (11)$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm j \frac{\omega_s}{2} \quad (12)$$

Para el caso de sistemas en tiempo discreto, aplicando el cambio de variable corresponde a un solo punto ubicado en el eje real del plano “ $z$ ” con abscisa negativa, por lo que los polos conjugados del sistema en tiempo discreto se describen en la ecuación (13).

$$z_{1,2} = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi} \quad (13)$$



### **Modelado de espacios de estado**

Debido a la necesidad de obtener mejores desempeños en los sistemas de control se ha introducido un nuevo enfoque basado en el concepto del estado de un sistema. Para el nuevo enfoque es necesario conocer algunos conceptos:

**Estado.** Es un conjunto esencial de variables de estado constituye el estado de un sistema dinámico. Puede predecir completamente el comportamiento del sistema en cualquier momento conociendo estas variables en el instante  $t = t_0$  y la entrada para  $t > t_0$  (Ogata, 1998).

**Variables de estado.** En un sistema dinámico son las más fundamentales que influyen en su estado (Ogata, 1998).

**Vector de estado.** Se toman en cuenta los "n" elementos de un vector "x" cuando se requieren n variables de estado para comprender exhaustivamente el funcionamiento de un sistema específico. Este conjunto se identifica como el vector de estado (Ogata, 1998).

**Espacios de estados.** El concepto de "espacio de estados" hace referencia a un espacio con "n" dimensiones donde los ejes de coordenadas corresponden a los ejes "x1", "x2", ..., "xn". El estudio de los espacios de estado se enfoca en tres variables relacionadas con los sistemas dinámicos: las variables de estado, las variables de entrada y las variables de salida del sistema (Ogata, 1998).

Las ecuaciones de estado que definen un sistema dinámico en su punto de operación y su salida se muestran en la ecuación (14).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{cases} \quad (14)$$

Donde:

A(t): Matriz de valores de estado

$B(t)$ : Matriz de valores de entrada

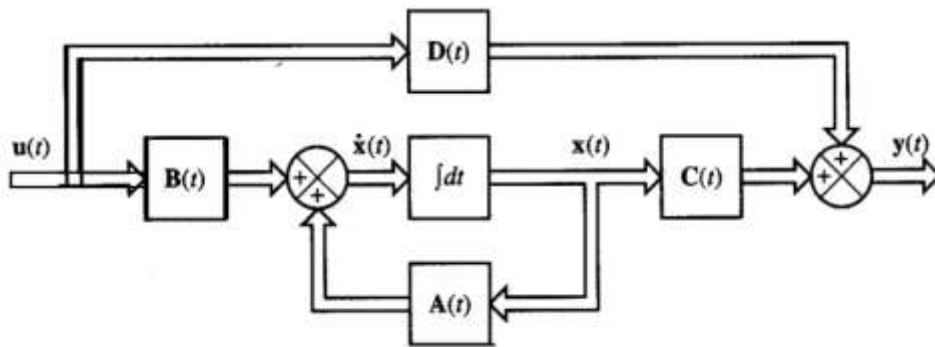
$C(t)$ : Matriz de valores de salida

$D(t)$ : Matriz de transformación directa

Las ecuaciones de estado son capaces de definir un sistema de control, en la Figura 27 se muestra la estructura de un sistema de control representado en espacios de estado.

### Figura 27

Diagrama de bloques de un sistema de control lineal representado en el espacio de estados.



Nota. Tomado de *Ingeniería de Control Moderna* (p. 73), por K. Ogata, 1998, Prentice Hall.

### Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo es el tiempo durante el cual se miden las variables del sistema, como la presión y el caudal, en sistemas neumáticos. La capacidad de afectar directamente la precisión y la velocidad del sistema es lo que lo hace importante. Aunque un tiempo de muestreo más corto proporciona datos de variables más precisos, puede tener un impacto negativo en la velocidad del sistema. Por otro lado, un tiempo de muestreo más prolongado mejora la velocidad de respuesta del sistema, pero reduce la precisión.

En los sistemas controlados por un computador digital, elegir un tiempo de muestreo adecuado es un requisito muy importante, según Astrom y Wittenmark (1997) “La reconstrucción de la señal en tiempo continuo se vuelve imposible si el tiempo de muestreo es

muy largo. Sin embargo, un tiempo de muestreo demasiado corto aumenta la carga computacional del dispositivo de control utilizado” (P. 114).

Para un sistema de primer orden se puede introducir el número de periodos de muestreo durante el tiempo de subida. El número de periodos de muestreo se aproxima a la ecuación (15).

$$N_r = \frac{T_r}{T_s} \quad (15)$$

Donde “ $T_r$ ” es el tiempo de subida, en sistemas de primer orden, el tiempo de subida es una constante y es razonable elegir entre 4 y 10 muestras durante el tiempo de subida.

Para sistemas de segundo orden el tiempo de subida según Astrom y Wittenmark (1997), se define puede definir en la ecuación (16).

$$T_r = \omega_n^{-1} e^{\phi / \tan \phi} \quad (16)$$

Donde el coeficiente de amortiguamiento del sistema es dado como  $\zeta = \cos \phi$  y  $\omega_n$  la frecuencia natural del sistema, para un valor  $\zeta \approx 0.701$  el tiempo de subida del sistema se aproxima a la ecuación (17).

$$T_r = \frac{0.2 \sim 0.6}{\omega_n} \quad (17)$$

Existen diversos métodos para determinar adecuadamente el tiempo de muestreo. Uno de ellos según la sugerencia de Ogata (1996) como regla práctica es realizar el muestreo de ocho a diez veces en el lapso del tiempo de levantamiento de la respuesta de un sistema sobreamortiguado frente a una entrada escalón. En el caso de sistemas subamortiguados, se recomienda realizar el muestreo de ocho a diez veces durante el ciclo de las oscilaciones senoidales amortiguadas a la salida del sistema.

## **Análisis de respuesta de sistemas**

El análisis de los sistemas de control es de suma importancia, puesto que permite obtener un conocimiento más profundo acerca del funcionamiento de dichos sistemas y posibilita la utilización de estrategias de control que resultan eficaces.

### ***Respuesta transitoria***

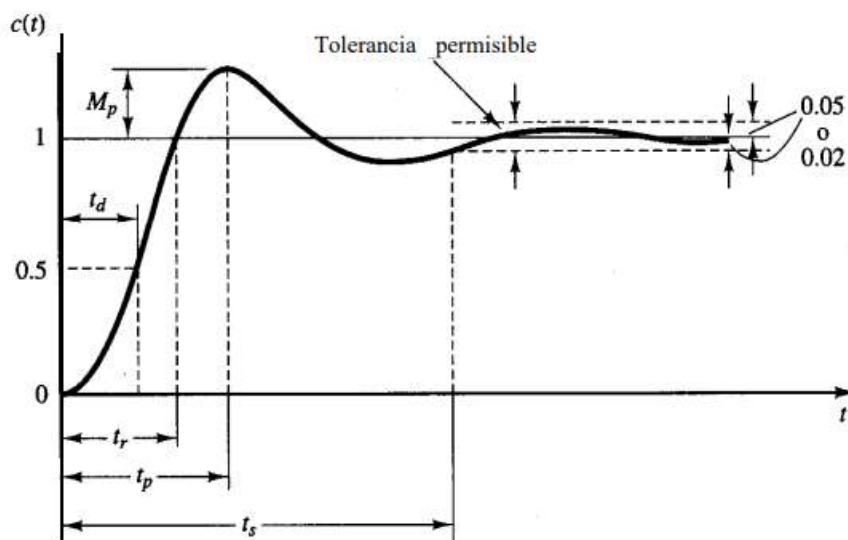
Las especificaciones de rendimiento de un sistema de control se determinan observando la reacción del sistema ante una entrada escalón durante la respuesta transitoria. Se utiliza esta señal porque es fácil de generar y al mismo tiempo representa un desafío significativo para evaluar el comportamiento del sistema

Es importante destacar que ciertas condiciones iniciales afectan la respuesta transitoria del sistema. Se utiliza con frecuencia una condición estándar en la que el sistema se encuentra en reposo inicial, lo que significa que todas las derivadas son cero, para facilitar la comparación. Con estas condiciones iniciales estandarizadas, es más fácil comparar diferentes sistemas y escenarios de control (Ogata, 1998).

Las características de un sistema de control se muestran en la Figura 28.

**Figura 28**

Curva de respuesta escalón unitario.



*Nota.* Respuesta al escalón de un sistema genérico, “ $c(t)$ ” es el eje de los valores de la respuesta, “ $t$ ” es el eje del tiempo. Tomado de *Ingeniería de Control Moderna* (p. 166), por Ogata K., 1998, Prentice-Hall.

El sistema comúnmente oscila antes de llegar a su régimen estable. El tiempo de retardo “ $t_d$ ”, tiempo de subida “ $t_r$ ”, tiempo pico “ $t_p$ ”, Sobrepasso máximo “ $M_p$ ” y tiempo de asentamiento “ $t_s$ ” son las características de un sistema de control ante una entrada escalón.

Las características del régimen transitorio son:

**Tiempo de retardo.** El tiempo de espera es el tiempo que lleva que la respuesta alcance la mitad del valor final por primera vez. En la Figura 28 se muestra el tiempo de retardo en una respuesta escalón representada por “ $t_d$ ” (Ogata, 1998).

**Tiempo de levantamiento.** La respuesta debe pasar del 10 al 90 %, del 5 al 95 % o del 0 al 100 % de su valor final. Se utiliza de 0 a 100 % para sistemas subamortiguados de segundo orden. Se utiliza entre el 10 y el 90% en sobreamortiguados. En la Figura 28 se muestra el tiempo de levantamiento en una respuesta escalón representada por “ $t_r$ ” (Ogata, 1998).

**Tiempo pico.** El tiempo pico es la cantidad de tiempo que lleva que la respuesta alcance el primer pico de sobrepaso (Ogata, 1998). En la Figura 28 se muestra el tiempo de pico en una respuesta escalón representada por “tp”.

**Sobrepaso.** El valor máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad, se conoce como sobrepaso (Ogata, 1998). En la Figura 28 se muestra el sobrepaso en una respuesta escalón representada por “Mp”.

El cálculo del porcentaje de sobrepaso se muestra en la ecuación (18):

$$\text{Sobrepaso [\%]} = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor en estado estable}}{\text{Valor en estado estable}} * 100\% \quad (18)$$

**Tiempo de asentamiento.** El tiempo de establecimiento es el período necesario para que la curva de respuesta llegue a una región en torno al valor final del tamaño y permanezca en ese intervalo (Ogata, 1998). En la Figura 28 se muestra el tiempo de asentamiento en una respuesta escalón representada por “ts”.

### ***Estabilidad en tiempo discreto***

Norman (2004) menciona que “Existen tres requerimientos para el diseño de un sistema de control: respuesta transitoria, estabilidad y errores en estado estable” (p. 325) también menciona que “La característica más importante de un sistema es la estabilidad. La respuesta transitoria y el error en estado estable son debatibles si un sistema es inestable” (p. 325) lo cual indica que no se puede controlar adecuadamente un sistema inestable para un requisito específico.

Norman (2004) indica la existencia de algunos conceptos de estabilidad de acuerdo con los puntos de vista, sin embargo, presenta algunas definiciones para estabilidad, inestabilidad y estabilidad marginal.

Cuando la respuesta disminuye hacia cero, conforme el tiempo se acerca al infinito, se considera que un sistema lineal e invariante en el tiempo es estable (Norman, 2004).

Si la respuesta aumenta indefinidamente a medida que el tiempo se acerca al infinito, se concluye que un sistema lineal e invariante en el tiempo es inestable (Norman, 2004).

Según los resultados de Norman (2004) "Si la respuesta libre no disminuye ni aumenta, sino que permanece constante o cambia a medida que avanza hacia el infinito, un sistema lineal e invariante con el tiempo es marginalmente estable" (p. 325).

En Astrom y Wittenmark (1997), se menciona el teorema de la estabilidad asintótica de sistemas lineales el introduce que "Un sistema lineal de tiempo discreto e invariante con el tiempo es asintóticamente estable si y solo si todos los valores propios del sistema están estrictamente dentro del círculo unitario" (p.79) por lo que para comprobar la estabilidad de un sistema en tiempo discreto se debe obtener los valores propios del sistema y observar si se encuentran dentro del círculo unitario.

**Pruebas de estabilidad.** En el teorema mencionado anteriormente dicho por Astrom y Wittenmark (1997) indica la forma básica de verificar la estabilidad de un sistema, para ello se calculan los valores propios de la matriz del sistema en espacios de estado. Existen algunos métodos computacionales para obtener de forma sencilla los valores propios mencionados.

Para investigar la estabilidad, es fundamental disponer de métodos algebraicos o gráficos. Estos métodos ayudan a comprender cómo los parámetros del sistema o del controlador afectarán la estabilidad.

Astrom y Wittenmark (1997) mencionan los siguientes:

- Cálculo numérico o algebraico de los valores propios del sistema.
- Método del lugar geométrico de las raíces.
- El criterio de Nyquist.
- Métodos basados en las propiedades de los polinomios característicos del sistema.
- Método de Lyapunov

- Criterio de Jury

Es importante destacar que no es igual realizar un análisis de estabilidad de sistema en el dominio del tiempo que en tiempo discreto, ya que en el dominio del tiempo existen otros métodos como el criterio de Routh-Hurwitz por lo que es deseable el análisis de estabilidad para sistemas en tiempo discreto. Sin embargo, los criterios en tiempo continuo pueden ser aplicados después cambiar de variable discreta a continua. Con los antecedentes mencionados los criterios más usados para determinar la estabilidad de un sistema se muestran continuación.

**Criterio de Routh-Hurwitz.** Según Hernández (2010) “Es un arreglo numérico para calcular el número de raíces de un polinomio específico del plano “s” en el semiplano derecho” (p. 244) lo que indica que se debe calcular el polinomio característico del sistema en primera instancia.

Se muestra en la ecuación (19) el polinomio característico del sistema.

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (19)$$

Según Giraldo y Tabares (1997) se puede construir la tabla mostrada en la Figura 29



**Figura 29**

Tabla construida a partir del criterio de Routh-Hurwitz

$s^n$	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$	$a_{n-6}$	$\dots$
$s^{n-1}$	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$	$a_{n-7}$	$\dots$
$s^{n-2}$	$b_1$	$b_3$	$b_5$	$b_7$	$\dots$
$s^{n-3}$	$b_2$	$b_4$	$b_6$	$b_8$	$\dots$
$s^{n-4}$	$c_1$	$c_3$	$c_5$	$c_7$	$\dots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$s^0$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Nota. Tomado de *Teoría de Control* (p. 210), por B. Giraldo y G. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

El criterio menciona que se deben obtener los coeficientes mostrados en la Figura 29. En Giraldo y Tabares (1997) obtienen los coeficientes de la Figura 30.

**Figura 30**

Coeficientes del método de Routh-Hurwitz

$$\begin{aligned}
 b_1 &= -\frac{\begin{bmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{bmatrix}}{a_{n-1}} & b_2 &= -\frac{\begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_1 & b_3 \end{bmatrix}}{b_1} & c_1 &= -\frac{\begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix}}{b_2} \\
 b_3 &= -\frac{\begin{bmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{bmatrix}}{a_{n-1}} & b_4 &= -\frac{\begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-5} \\ b_1 & b_5 \end{bmatrix}}{b_1} & c_3 &= -\frac{\begin{bmatrix} b_1 & b_5 \\ b_2 & b_6 \end{bmatrix}}{b_2}
 \end{aligned}$$

Nota. Tomado de *Teoría de Control* (p. 210), por B. Giraldo y G. Tabares, 1997, Universidad Tecnológica de Pereira.

Para garantizar la estabilidad del sistema, es requerido que todas las constantes en la primera columna sean positivas. En situaciones de inestabilidad, la cantidad de raíces en el plano complejo derecho coincide con el número de cambios de signo (Giraldo y Tabares, 1997), lo cual se resume en la inecuación (20).

$$a_n, a_{n-1}, b_1, b_2, c_1 \dots > 0 \quad (20)$$

**Criterio de estabilidad de Jury.** Es un criterio de estabilidad similar al criterio de Routh-Hurwitz es el criterio de estabilidad de Jury con la particularidad de que se puede aplicar directamente a sistemas de tiempo discreto expresados en la variable “z” (Charles y Nagle, 1984).

Se muestra en la ecuación (21) el polinomio característico del sistema en tiempo discreto debe:

$$F(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0, a_n > 0 \quad (21)$$

Según Charles y Nagle (1984) se puede construir la Tabla 1 con la distribución de la prueba de estabilidad de Jury.

**Tabla 1**

*Distribución de la prueba de estabilidad de Jury*

$z^0$	$z^1$	$z^2$	...	$z^{n-k}$	...	$z^{n-1}$	$z^n$
$a_0$	$a_1$	$a_2$	...	$a_{n-1}$	...	$a_{n-1}$	$a_n$
$a_n$	$a_{n-1}$	$a_{n-2}$	...	$a_1$	...	$a_1$	$a_0$
$b_0$	$b_1$	$b_0$	...	$b_{n-k}$	...	$b_{n-k}$	
$b_{n-1}$	$b_{n-2}$	$b_{n-3}$	...	$b_{k-1}$	...	$b_0$	
$c_0$	$c_1$	$c_2$	...	$c_{n-k}$	...		
$c_{n-2}$	$c_{n-3}$	$c_{n-4}$	...	$c_{k-2}$			
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
$l_0$	$l_1$	$l_2$	$l_3$				
$l_3$	$l_2$	$l_1$	$l_0$				
$m_0$	$m_1$	$m_2$					

*Nota.* Tomado de *Sistemas de Control Digital Análisis y Diseño* (p. 227), por L. Charles y H. Nagle, 1984, Prentice Hall.

El criterio menciona que se deben obtener los coeficientes de la Tabla 1. Charles y Nagle (1984) obtienen los coeficientes de la Figura 31.

**Figura 31**

*Coefficientes del criterio de Jury*

$$b_k = \begin{vmatrix} a_0 & a_{n-k} \\ a_n & a_k \end{vmatrix} \quad c_k = \begin{vmatrix} b_0 & b_{n-1-k} \\ b_{n-1} & b_k \end{vmatrix}$$

$$d_k = \begin{vmatrix} c_0 & c_{n-2-k} \\ c_{n-2} & c_k \end{vmatrix}$$

*Nota.* Tomado de *Sistemas de Control Digital Análisis y Diseño* (p. 227), por L. Charles y H. Nagle, 1984, Prentice Hall.

Las condiciones adecuadas y suficientes para que el polinomio  $F(z)$  no tenga raíces fuera del círculo unidad, con  $a_n > 0$ , con las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$F(1) > 0 \quad (22)$$

$$(-1)^n * F(-1) > 0 \quad (23)$$

$$|a_0| > a_n \quad (24)$$

$$|b_0| > |b_{n-1}| \quad (25)$$

$$|c_0| > |c_{n-2}| \quad (26)$$

$$|d_0| > |d_{n-3}| \quad (27)$$

$$|m_0| > |m_2| \quad (28)$$

Así mismo, Charles y Nagle (1984) mencionan que la distribución solo contiene una fila para un sistema de segundo orden. Se agregan dos filas a la distribución para cada número adicional de pedidos (p. 228).

### Controlabilidad y observabilidad

Dentro del análisis de sistemas de control, se consideran varias características, pero dos propiedades que tienen una gran importancia en el diseño de controladores para lograr una respuesta deseada eficiente y efectiva son la controlabilidad y la observabilidad del sistema.

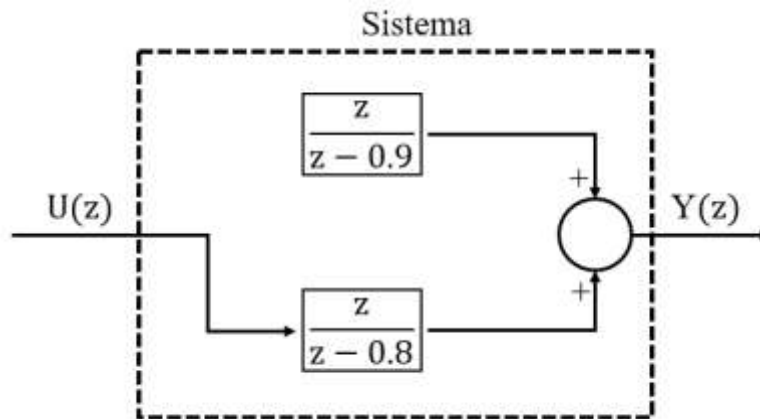
**Controlabilidad.** Según Charles y Nagle (1984) el sistema de la ecuación (29) es controlable en el supuesto de que exista una secuencia de entrada  $u(0), u(1), u(2), \dots, u(N)$  que lleve el sistema desde un estado inicial  $x(0)$  a estado final  $x(N)$ , siendo  $N$  infinito (p. 329).

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (29)$$

Para el sistema de la Figura 32, Charles y Nagle (1984) indica que “la entrada  $U(k)$  no tiene influencia en el estado del bloque superior; así pues, el sistema es incontrolable” (p. 329).

**Figura 32**

*Sistema incontrolable.*



*Nota.* Tomado de *Sistemas de Control Digital Análisis y Diseño* (p. 329), por L. Charles y H. Nagle, 1984, Prentice Hall.

Las condiciones para que el sistema de la ecuación (29) sea controlable se detallan a continuación en la ecuación (30).

$$x(N) - A^N x(0) = [B \ AB \ \dots \ A^{N-1}B] \begin{bmatrix} u(N-1) \\ u(N-2) \\ \dots \\ u(0) \end{bmatrix} \quad (30)$$

El sistema es controlable si para una única entrada, la matriz B es una columna de dimensión n y para n entradas debe ser de dimensión nxn, así mismo debe existir el inverso de la matriz formada en la ecuación (31) (Charles y Nagle, 1984).

$$C_0 = [B \ AB \ \dots \ A^{N-1}B] \quad (31)$$

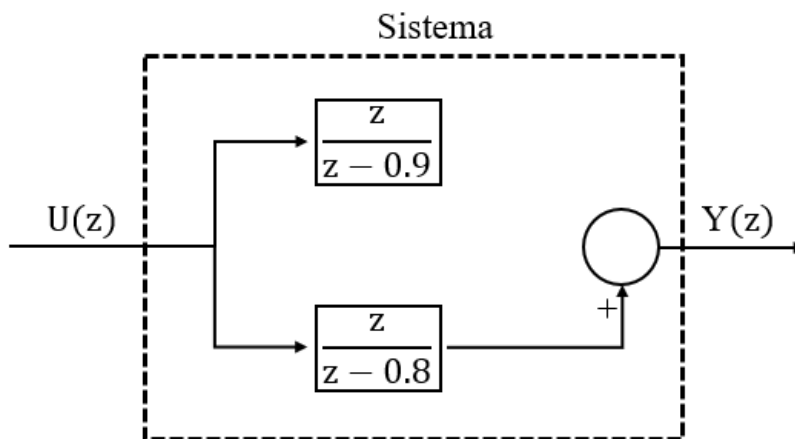
**Observabilidad.** El sistema de la ecuación (32) es evidente en el supuesto de que el estado inicial  $x(0)$  puede calcularse para cualquier  $x(0)$  a partir de N medidas  $y(0), y(1), \dots, y(N-1)$ , siendo N infinito (Charles y Nagle, 1984).

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (32)$$

Para el sistema de la Figura 33 debido a que el estado del bloque superior no contribuye a la salida  $y(k)$ , el sistema no se puede observar (Charles y Nagle, 1984).

**Figura 33**

*Sistema inobservable.*



*Nota.* Tomado de *Sistemas de Control Digital Análisis y Diseño* (p. 330), por L. Charles y H. Nagle, 1984, Prentice Hall.

Las condiciones para que el sistema de la ecuación (32) sea observable se detallan a continuación en la ecuación (33).

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} x(0) \quad (33)$$

El sistema es observable si para una única salida, la matriz C es una fila de dimensión n y para n salidas debe ser de dimensión “nxn”, así mismo debe existir el inverso de la matriz formada en la ecuación (34) (Charles y Nagle, 1984).

$$\text{Obs} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Cabe destacar que para que exista inversa de un matriz de orden “n”, el rango de la matriz es igual a n o cuando su determinante es distinto de cero.

### **Sintonización de controladores PID en tiempo discreto**

En la actualidad existen algunos métodos y técnicas de sintonización, sin embargo, uno de los métodos más común usado tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto, es el método de ubicación de polos.

#### ***Ubicación de polos***

La metodología de diseño comienza por establecer los polos en lazo cerrado deseados basados en la respuesta transitoria y/o las necesidades de respuesta en frecuencia, tales como la rapidez, el coeficiente de amortiguamiento relativo o la amplitud de banda, además de los requisitos de estado estable (Ogata, 1998), con ello la técnica de ubicación de polos obliga al sistema a tener los polos en lazo cerrado en cualquier posición deseada.

Si diseña un controlador de manera que los polos dominantes en lazo cerrado posean un coeficiente de amortiguamiento y una frecuencia natural no amortiguada deseados, por lo que antes de diseñar el controlador se debe conocer o especificar los factores de desempeño

(Ogata, 1998). Ogata (1998) también menciona que “El requerimiento es que el sistema sea de estado completamente controlable” (p. 788)

Según Norman (2004) existen una “metodología de ubicación de polos para plantas representadas en forma de las variables de fase” (p. 723) esta metodología se describe a continuación.

Según Norman (2004) se debe:

- Mostrar la planta como variables de fase.
- Utilizar una ganancia “K” para retroalimentar cada variable de fase a la entrada de la planta.
- Encontrar la ecuación característica del sistema en lazo cerrado que se muestra en el paso anterior.
- Encontrar todas las ubicaciones de polo en un lazo cerrado y calcular una ecuación característica equivalente.
- Despejar “K” e igualar los coeficientes de las ecuaciones características de los ítems anteriores (p. 723).

Al seguir la metodología expuesta, la representación de fase de la planta se representa por las ecuaciones (35), (36), (37).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \quad (37)$$

La ecuación característica de la planta estaría dada por la ecuación (38).

$$z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_1z + a_0 = 0 \quad (38)$$

Al retroalimentar al sistema por una matriz de constantes, la cuales serían las ganancias de retroalimentación de las variables de fase, la entrada del sistema estaría dada por la ecuación (39).

$$u = -Kx \quad (39)$$

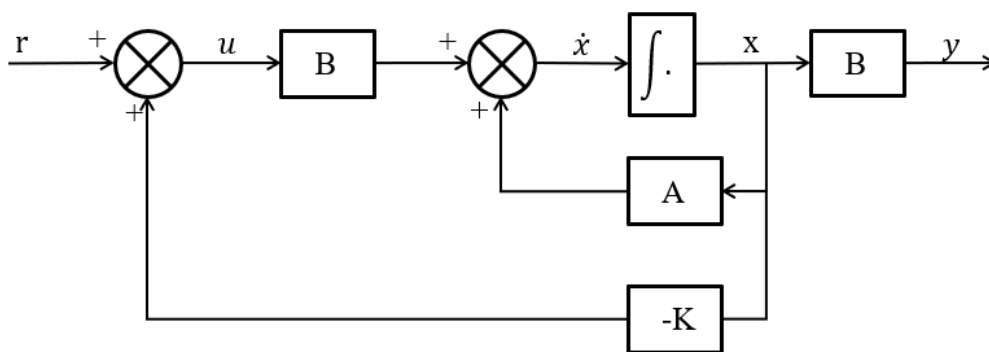
La matriz del sistema en lazo cerrado está dada por la ecuación (40).

$$A - BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -(a_0 + k_1) & -(a_1 + k_2) & -(a_2 + k_3) & \dots & -(a_{n-1} + k_n) \end{bmatrix} \quad (40)$$

La ecuación característica del sistema en lazo cerrado de la Figura 34 se puede describir según la ecuación (41).

### Figura 34

*Planta con retroalimentación del estado.*



*Nota. Tomado de Sistemas de Control para Ingeniería (p. 722), por Norman S., 2004, Continental.*

$$\begin{aligned} \det(zI - (A - BK)) \\ = z^n + (a_{n-1} + k_n)z^{n-1} + (a_{n-2} + k_{n-1})z^{n-2} + \dots + (a_1 + k_2)z \\ + (a_0 + k_1) = 0 \end{aligned} \quad (41)$$

La ecuación característica del sistema en lazo cerrado deseada se puede escribir según la ecuación (42), donde “d<sub>i</sub>” son los coeficientes deseados.



$$z^n + d_{n-1}z^{n-1} + d_{n-2}z^{n-2} + \dots + d_1z + d_0 = 0 \quad (42)$$

Al igualar las ecuaciones (41) y (42) y despejar la constante de retroalimentación, se obtiene la ecuación (43).

$$k_{i+1} = d_i - a_i \quad ; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \quad (43)$$

### Sistema neumático

Un sistema neumático es aquel que emplea aire comprimido como medio de transmisión de potencia. Sus principales componentes son: Unidad de suministro de aire comprimido, unidad de mantenimiento y lubricación, válvulas de accionamiento, válvulas direccionales, válvulas de control, acondicionamiento de actuadores (mecánico o eléctrico), actuadores (Gerhartz y Scholz, 2002).

En la Tabla 2 se muestran algunas características importantes de los sistemas neumáticos.

**Tabla 2**

*Características sistemas neumáticos.*

Característica	Observación
Fuente de energía	Motor eléctrico o combustible de origen fósil
Almacenamiento de energía	Buena (Reservorio)
Costo de energía	Muy Alta
Actuadores rotacionales	Rango amplio de velocidades, difícil control preciso de velocidad.
Actuadores lineales	Cilindros, fuerza media.
Fuerza controlable	Fuerza media controlable.
Puntos a tomar en cuenta	Ruido

*Nota.* Adaptado de *Hydraulics and Pneumatics* (p. 8), por A. Parr, 1998, Elsevier Ltd.

## **Unidad de mantenimiento neumático**

Una unidad de mantenimiento neumático es un elemento que cumple la función de depuración del aire comprimido que será suministrado a los elementos de un sistema neumático. Es conocida como “FRL” por las iniciales de filtros, reguladores y lubricadores, elementos presentes en una unidad de mantenimiento neumático.

La eficiencia de la maquinaria de vanguardia está estrechamente ligada a la calidad del aire comprimido que utiliza. Para lograr un rendimiento óptimo, es fundamental contar con unidades de mantenimiento que aseguren la pureza del aire, prolonguen la vida útil de los equipos y favorezcan un funcionamiento adecuado. (Manzucó, 2020)

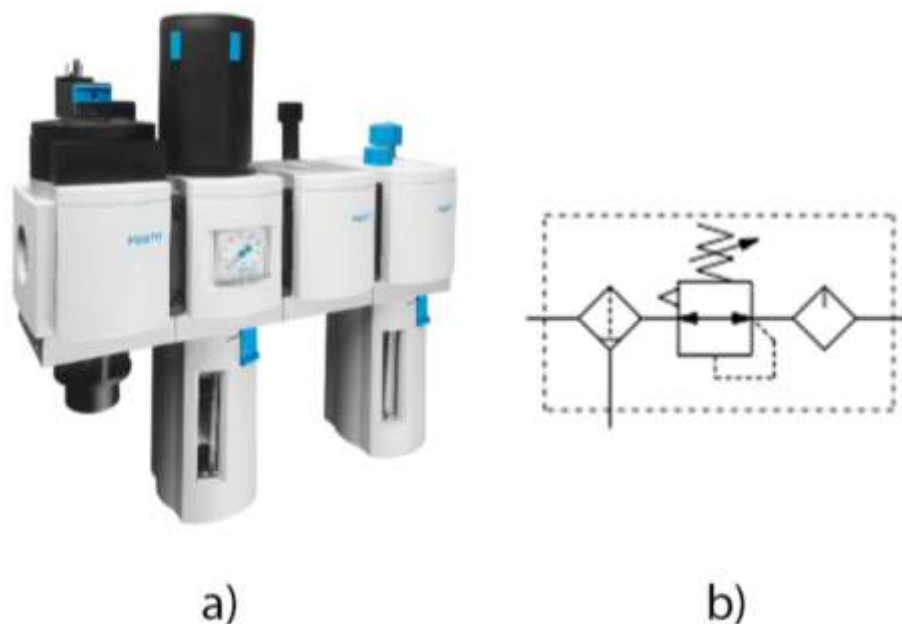
Las funciones principales de una unidad de mantenimiento son:

- Purificación del aire para mantenerlo limpio de elementos no deseados, capturando contaminantes como agua, polvo y aceite.
- Control continuo de la presión del aire para garantizar un suministro adecuado a los equipos.
- Proporcionar lubricación al aire comprimido para disminuir la fricción entre las piezas móviles de la maquinaria.

En la Figura 35 se muestra una unidad de mantenimiento con su simbología.

## Figura 35

Unidad de mantenimiento y símbolo según Norma ISO1219-1.



*Nota.* a) Unidad de mantenimiento. Tomado de *Unidades de mantenimiento combinadas* [Fotografía], por Festo AG & Co, s.f., Festo Web Site, ([https://www.festo.com/co/es/p/unidades-de-mantenimiento-combinadas-id\\_MSB4/?page=0](https://www.festo.com/co/es/p/unidades-de-mantenimiento-combinadas-id_MSB4/?page=0)). b) Simbología según Norma ISO1219-1.

## Válvula proporcional direccional de caudal

Una válvula proporcional direccional de caudal tiene un carrete con control de posición que convierte una señal análoga de entrada en una abertura correspondiente de la sección de las salidas de la válvula, el uso de este tipo de válvulas en combinación con controladores de posición externos permite la creación de sistemas de posicionamiento neumático (Festo AG & Co, 2021).

En la Figura 36 se muestra una válvula proporcional con su simbología.

**Figura 36**

Válvula proporcional direccional de caudal y su simbología en Norma ISO1219-1

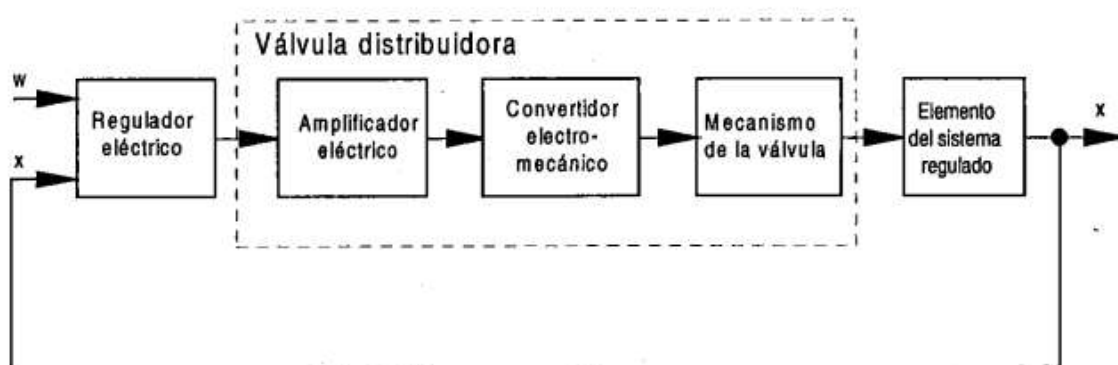


Nota. a) Válvula proporcional direccional de caudal. Tomado de *Proportional directional control valves MPYE* [Archivo PDF] (p. 2), por Festo AG & Co, 2021. [https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id\\_MPYE\\_1/?page=0](https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id_MPYE_1/?page=0) b) Simbología según Norma ISO1219-1.

El funcionamiento interno de una válvula proporcional direccional de caudal puede explicarse empleando el esquema mostrado en la Figura 37.

**Figura 37**

Esquema de componentes de una válvula proporcional direccional.



*Nota.* La señal “w” representa el valor análogo de voltaje con el cual se alimenta a la válvula, mientras que “x” es la posición de la corredera correspondiente al valor de “w”. Tomado de Neumática en Bucle cerrado (p. 344), por D. Gerhartz y J. Scholz, 2002, Festo Didactic.

### ***Finalidad de una válvula distribuidora en un circuito de regulación en bucle cerrado***

Una válvula distribuidora actúa como elemento final de control en un circuito de regulación en bucle cerrado. Según Gerhartz y Scholz (2002) las válvulas distribuidoras se utilizan en diferentes circuitos de regulación en bucle cerrado como:

- En circuitos de posicionado.
- En circuitos de regulación de velocidad lineal.
- En circuitos de velocidad de giro.
- En circuitos de regulación de ángulo de giro.
- En circuitos de regulación de caudal (p. 340).

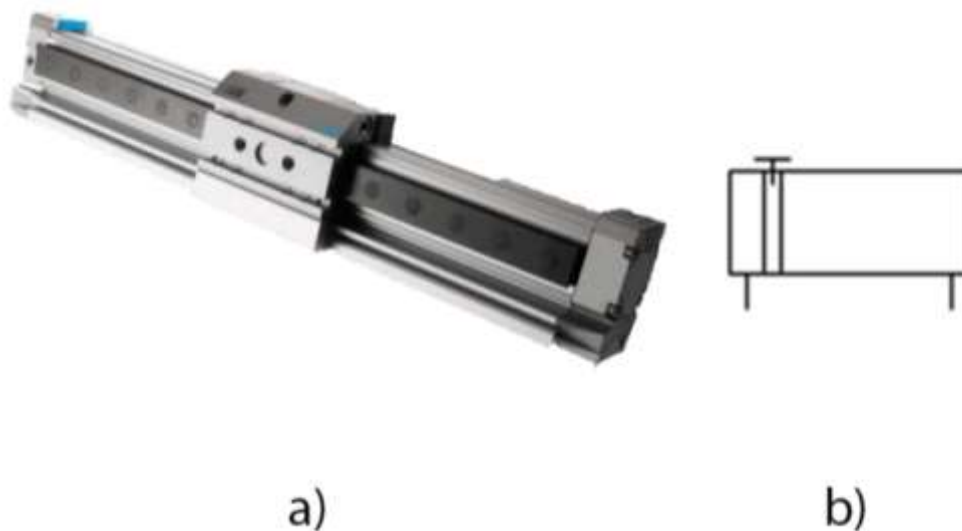
### **Actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago**

Es un actuador neumático lineal el cual desliza su pistón a través de su camisa a medida que ingresa aire por una de sus vías y genera mayor presión en una de sus recámaras en comparación con la otra, empujando el pistón. Recibe el nombre de doble efecto ya que puede realizar trabajo en ambas direcciones, este tipo de actuador lineal sin vástago tiene una corredera permanentemente unida con el pistón que se desliza por el exterior de la camisa, a esta corredera le son montados diversos elementos que se requiera se muevan con la misma (Festo AG & Co, 2003).

En la Figura 38 se muestra un actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago con su simbología.

**Figura 38**

*Actuador neumático lineal de doble efecto y su simbología en Norma ISO1219-1*

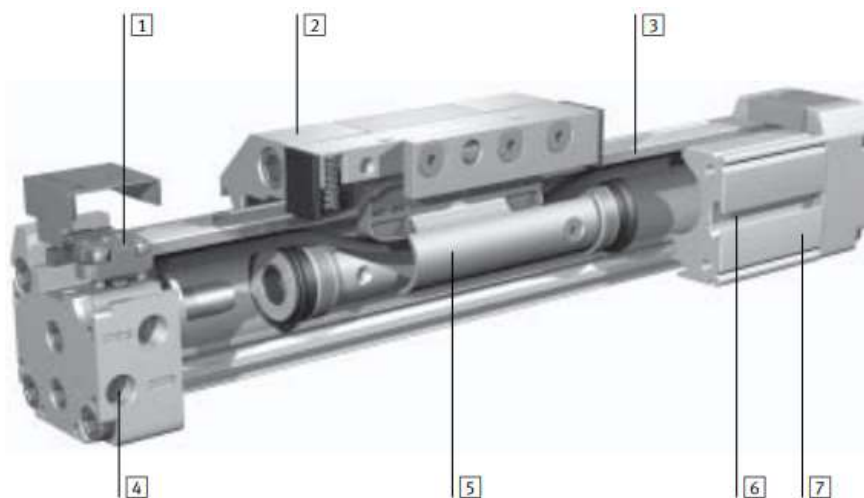


*Nota.* a) Actuador neumático lineal de doble efecto DGPL. Tomado de *DGP/DGPL rodless drive units* [Archivo PDF] (p. 1), por Festo AG & Co, 2003, [https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id\\_pim216/](https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id_pim216/) b) Simbología según Norma ISO1219-1.

En la Figura 39 se muestran las partes principales de un actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago con una vista seccionada del elemento.

### Figura 39

Partes principales de un actuador neumático lineal de doble efecto sin vástago.



Nota. 1) Amortiguamiento de final de carrera, 2) Corredera permanentemente unida al pistón, 3) Tira de cubierta, protege al actuador de ingreso de suciedad, 4) Entrada de aire a las recámaras, 5) Pistón, 6) Ranura para montaje de sensores y elementos de montaje, 7) Perfil estable. Tomado de *DGP/DGPL rodless drive units* (p. 6), por Festo AG & Co, 2003.

[https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id\\_pim216/](https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id_pim216/)

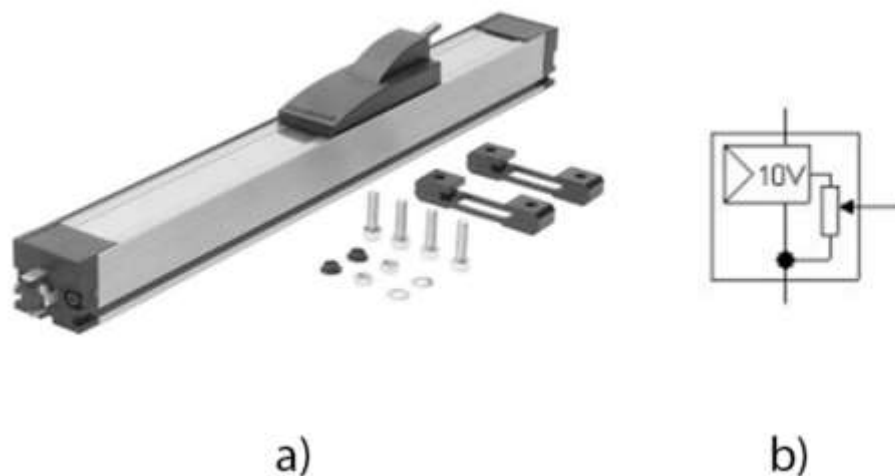
### Potenciómetro lineal

Es una resistencia variable con 3 terminales la cual cambia su valor de resistencia entre dos de sus terminales de acuerdo con la posición de la corredera en la carrera del elemento. La corredera se puede acoplar a un elemento móvil de un actuador lineal el cual al deslizarse varía el valor de resistencia entre sus terminales por lo que vuelve posible conocer la posición del pistón de forma indirecta al excitarlo con un voltaje en sus terminales y medir la variación del mismo (Festo AG & Co, 2016).

En la Figura 40 se muestra un potenciómetro lineal con su simbología.

## Figura 40

*Potenciómetro lineal y su simbología en Norma ISO1219-1*



*Nota.* a) Potenciómetro lineal MLO-POT-450-TLF. Tomado de *Position Sensors* [Fotografía], por Festo AG & Co, s.f., <https://www.festo.com/us/en/a/152628/> b) Simbología según Norma ISO1219-1, el valor de voltaje de alimentación puede variar dependiendo los requerimientos.

## Controlador lógico programable (PLC)

Programable Logic Controller (Controlador lógico programable en español) es un dispositivo electrónico de naturaleza digital, concebido para operar en contextos industriales, que se vale de una memoria programable para almacenar internamente instrucciones destinadas a ejecutar funciones particulares como lógica, secuenciación, sincronización, conteo y cálculos. Su finalidad radica en controlar una variedad de máquinas o procesos a través de entradas y salidas, ya sean de carácter digital o analógico. El diseño de un PLC y/o elementos periféricos está dirigido su integración en el entorno de control industrial y a ser empleados de una forma sencilla (International Electrotechnical Commission, 2003).

En la Figura 41 muestra un PLC de la marca Siemens.



## Figura 41

PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC Siemens



*Nota.* Tomado de *Data sheet 6ES7214-1AG40-0XB0* [Archivo PDF] (p. 1), por Siemens AG, 2023. <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7214-1AG40-0XB0>

## Human machine interface (HMI)

Human Machine Interface (Interface Humano-Máquina en español) es “La colección de hardware y software utilizada por el operador y otros usuarios para monitorear e interactuar con el sistema de control y con el proceso a través del sistema de control” (International Society of Automation, 2015).

En el desarrollo de HMI's se sigue la normativa presente en la norma ISA-101.01 y se recomienda su evaluación bajo los 10 puntos enunciados en la guía GEDIS, estos criterios son:

**Arquitectura.** Correspondencia con la planta, número de capas y existencia de mapa.

**Distribución.** Consistencia, densidad, simetría y balance flujo de proceso.

**Navegación.** Correspondencia con la arquitectura, accesibilidad, consistencia.

**Uso del color.** Visibilidad, contraste con el fondo, número de colores, diferenciación entre colores, uso de colores típicos, consistencia.

**Información textual.** Número de fuentes, número de tamaños, visibilidad del texto, espaciamiento, alineación, uso de énfasis, coloración del texto, consistencia.

**Símbolos y representación de los equipos.** Reconocimiento, visibilidad del estado del equipo, consistencia.

**Valores de proceso.** Visibilidad, ubicación, distribución, agrupación de datos y consistencia.

**Tablas y grupos de tendencia.** Formato, visibilidad, ubicación, agrupación, flexibilidad de configuración de tendencias y consistencia.

**Comando e ingreso de datos.** Visibilidad, maniobrabilidad, retroalimentación y consistencia.

**Alarmas.** Visibilidad de las alarmas, accesibilidad a las alarmas, ubicación de las alarmas, información de alarmas, visibilidad de alarmas, facilidad de reconocimiento y consistencia (Ponsa et al., 2007).

## Capítulo III

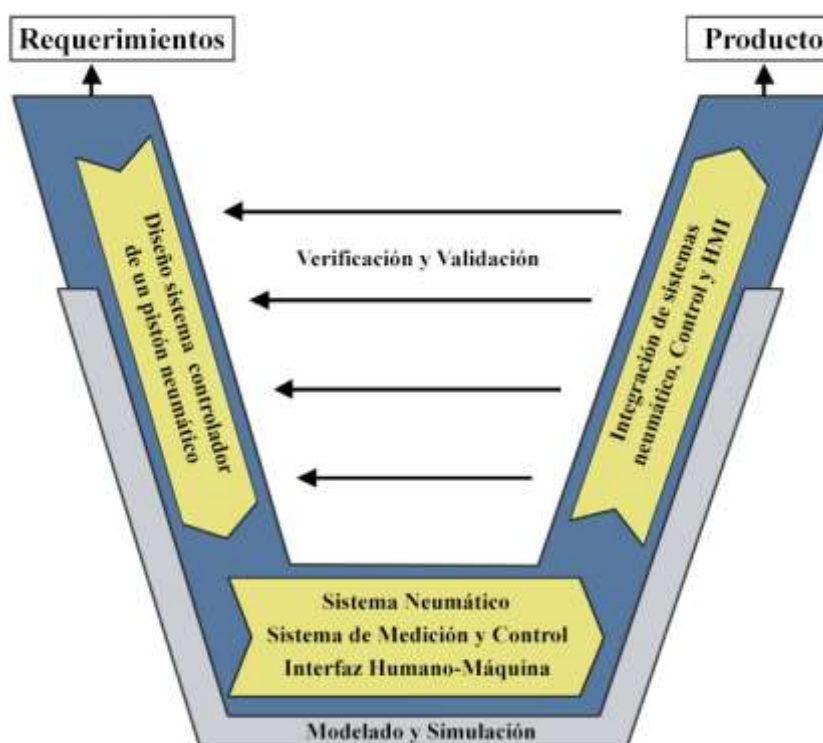
### Diseño e Implementación

#### Metodología de diseño

La metodología empleada es la propuesta en la norma VDI 2206, la cual se enfoca en el diseño de sistema mecatrónicos, la misma se muestra en la Figura 42.

#### Figura 42

*Modelo V como macrociclo para el proyecto.*



*Nota.* Adaptado de VDI 2206 – A New Guideline for the Design of Mechatronics Systems (p. 788), J. Gausemeler y S. Moehringer, 2002, IFCA Publications.

La metodología propone un modelo de diseño de sistemas mecatrónicos, la cual se compone de varias fases, mismas que ofrecen una secuencia de actividades para la identificación de la información necesaria para el desarrollo de un sistema mecatrónico, las fases aplicadas al proyecto se enuncian a continuación:

### ***Definición de requerimientos***

Se empieza por definir el proyecto y las necesidades que el sistema deberá cubrir, enunciando aquellas más importantes. A partir de estos requerimientos partirá el desarrollo del proyecto con el fin de que el diseño, modificación, verificación e implementación se base en los mismos. Se definen los siguientes requerimientos principales:

- Implementación del circuito neumático para el actuador lineal.
- Diseño del sistema de adquisición de posición para el actuador y control con PLC.
- Programación de una rutina de control PID con PLC.
- Construcción de una estructura donde sean montados los elementos mecánicos, neumáticos y electrónicos para su uso en el laboratorio de Neumática e Hidráulica.
- Uso de una interfaz humano-máquina (HMI) que permita la visualización y control de los parámetros por parte de un usuario.

### ***Diseño del sistema***

El sistema se puede dividir en tres partes fundamentales que cumplen una función específica:

**Sistema neumático.** Proporcionar el movimiento mecánico por medio de energía neumática, con los siguientes elementos: Unidad de mantenimiento, actuador neumático lineal y válvula neumática proporcional direccional.

**Sistema medición y control.** Adquisición de la variable posición del actuador neumático lineal para su posterior control, empleando un potenciómetro lineal, y PLC.

**HMI.** Visualización y control de los parámetros por parte de un usuario, con el uso de una pantalla táctil controlada por una placa Raspberry Pi.

### ***Diseño de sistemas específicos***

**Sistema neumático.** La energía neumática es la encargada de mover el actuador lineal, el mismo podrá controlarse con uso de la válvula proporcional direccional, este sistema ha de diseñarse de tal forma que no presente fallos como fugas de aire ni rozamientos elevados en las partes móviles, además, el actuador tendrá una buena respuesta frente a los cambios de la válvula, presentando el comportamiento deseado.

**Sistema medición y control.** En el sistema es necesario realizar la instrumentación del potenciómetro lineal, con el fin de obtener una señal que pueda ser interpretada por el PLC con alta precisión, será necesario el uso de una rutina PID, misma que permite realizar el control de la variable posición.

**HMI.** El sistema permitirá la visualización y control de la posición del actuador lineal, la interfaz debe ser de fácil uso y comunicarse con el sistema de control para las acciones de obtención y envío de datos.

### ***Integración del sistema***

Los diferentes subsistemas se realizarán de forma secuencial e independiente, es decir, se comenzará por el sistema Neumático, seguido de Medición y Control y finalmente HMI, cada sistema deberá ser aprobado antes de iniciar con el siguiente, de esta forma los sistemas se integrarán de forma paulatina conforme los mismos sean desarrollados.

### ***Modelamiento y simulación***

Se realizará el modelado del sistema mediante la identificación de este con herramientas de software utilizando métodos para “black box” el cual será la planta conformada por el conjunto: válvula proporcional, actuador y potenciómetro lineales; y simulación de la respuesta del controlador PID con el fin de sintonizar los parámetros del controlador. En esta etapa se hace uso de herramientas existentes de un software de simulación numérica.

### ***Verificación y validación***

Tras la implementación de cada sistema, se realizarán pruebas preliminares para la verificación de su funcionamiento, posterior a la integración de todos los sistemas se realizarán pruebas finales para la validación del cumplimiento de los requerimientos definidos.

### ***Producto***

Un sistema conformado por un sistema neumático y una HMI que permita a un usuario controlar la posición de dicho actuador con una alta precisión y velocidad, con el uso de un PLC y una rutina de control PID.

### **Requerimientos soporte estructural**

Ya que se desea el producto final se emplee como una estación de trabajo en el laboratorio de neumática e hidráulica, se diseña un soporte mecánico para todos los elementos empleados en el proyecto, tomando en cuenta que varios elementos deben ser montables y desmontables fácilmente para su uso en otras aplicaciones en caso de ser necesario, por lo que se definen los siguientes requerimientos:

- Incluir una placa de aluminio ranurada para el montaje de elementos neumáticos.
- Incluir canaletas para insertar el módulo en el cual está montado el PLC y la fuente de 24V que alimentará al sistema.
- Soportar una caja eléctrica donde se colocarán elementos de mando y control, así como una interfaz HMI.

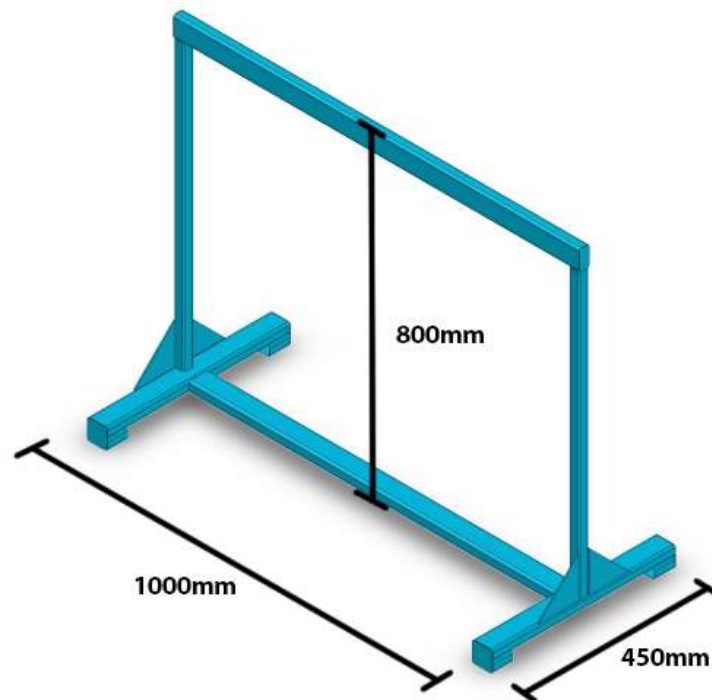
Es válido acotar que el diseño de ser posible debe permitir el uso de la estación de ambos lados de esta, con el fin de aumentar las capacidades de uso del laboratorio.

### Diseño soporte estructural

El diseño propuesto para el soporte construido con acero negro de 1mm de espesor se muestra en la Figura 43, para la elección de las dimensiones se tomó en cuenta que el soporte estará sobre una mesa de 75cm, el tamaño de los elementos neumáticos, las dimensiones de las canaletas necesarias para montar los módulos a emplear y la ergonomía al usuario.

### Figura 43

*Diseño soporte estructura con medidas principales.*

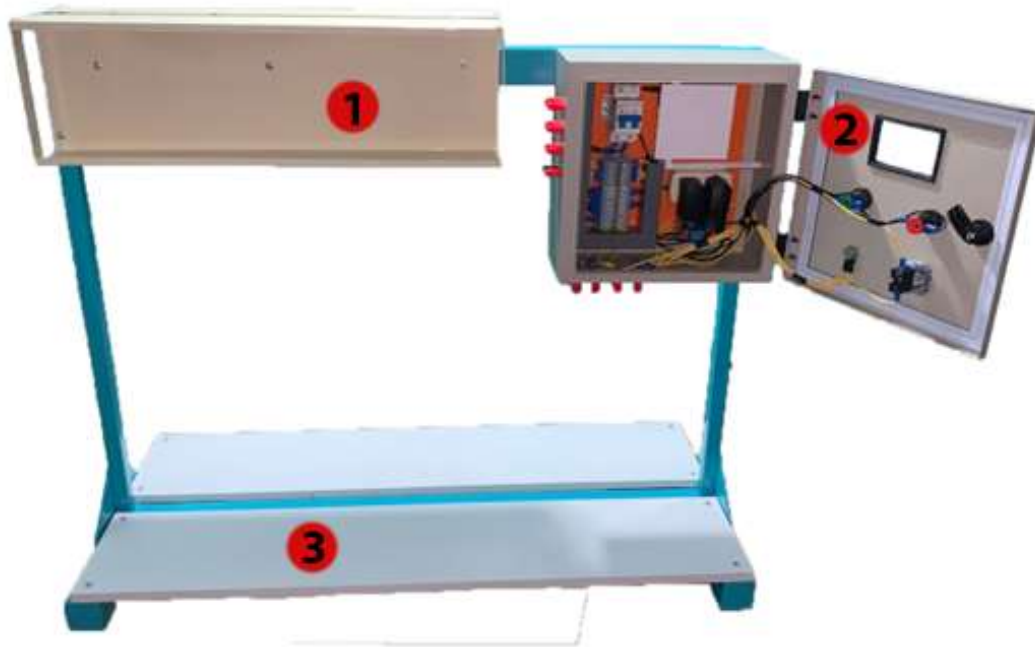


El soporte incluirá una tabla en la parte inferior para colocar cualquier elemento que se desee, una placa de aluminio ranurada en la parte central y canaletas en la parte superior, además se dispondrá de un espacio para el montaje de una caja eléctrica.

En la Figura 44 se muestra el soporte construido, las tablas inferiores, las canaletas y el tablero eléctrico fueron ensamblados usando pernos a la estructura.

**Figura 44**

*Estructura construida con canaletas, tablas y caja eléctrica montadas.*



*Nota.* 1) Canaletas, 2) Tablero eléctrico, 3) Tablas.

### **Requerimientos sistema neumático**

El sistema neumático se compone por una unidad de mantenimiento, una válvula proporcional distribuidora MPYE-5-1/8-HF-010-B mostrada en la Figura 36 y un pistón neumático DGPL-20-450-PPV-KF, ambos elementos neumáticos trabajan con una presión de aire nominal de 6 bar, esta presión de aire es ajustada desde la unidad de mantenimiento.

El pistón empleado marca FESTO, mostrado en la Figura 39 tiene un recorrido de 450 mm y diámetro del émbolo de 18 mm (Festo AG & Co, 2003).

El sistema neumático debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Fácil montaje y desmontaje de piezas.
- Conexiones neumáticas sin fugas de aire.
- Lubricación adecuada de elementos móviles.

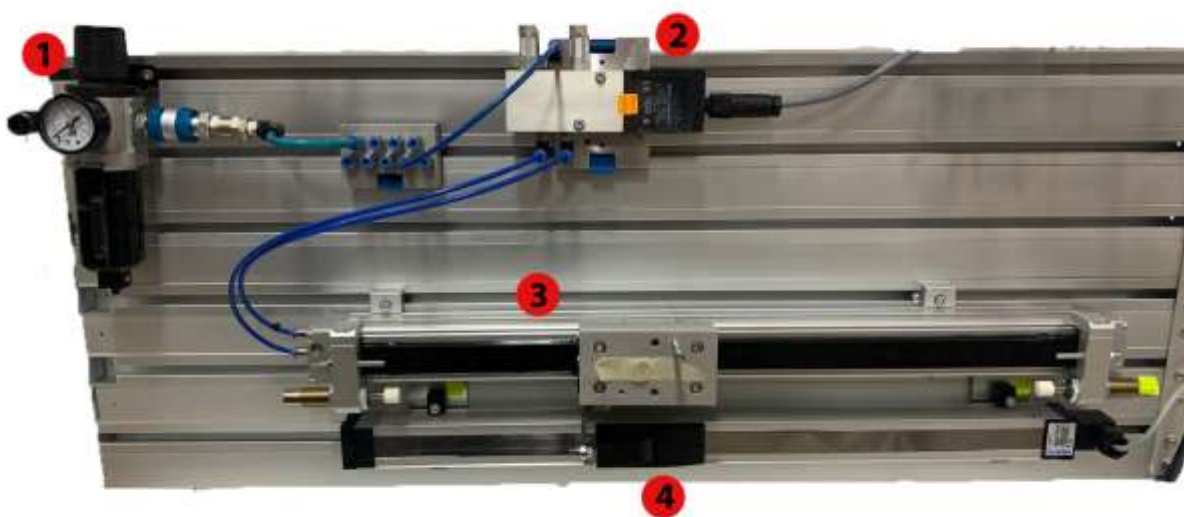


## Montaje sistema neumático

Se montan los elementos en una placa ranurada y se ajustan fijamente con los tornillos adecuados, las conexiones neumáticas son realizadas con manguera “automation”, el resultado se muestra en la Figura 45.

### Figura 45

*Sistema neumático montado.*



*Nota.* 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.

La corredera del actuador neumático es lubricada con grasa liviana con el fin de mejorar su deslizamiento, cabe notar que la carrera del actuador es de 450mm y a sus extremos se colocan 2 muelles con el fin de evitar que la corredera choque con los extremos del actuador.

## Requerimientos sistema de medición y control

El sistema de medición y control comprende todos los elementos mecánicos y electrónicos encargados de la adquisición de la variable posición de la corredera del actuador

lineal, comandar la válvula proporcional direccional y el procesamiento de datos. A continuación, se enuncian de manera específica los diferentes requerimientos para el sistema de medición y control:

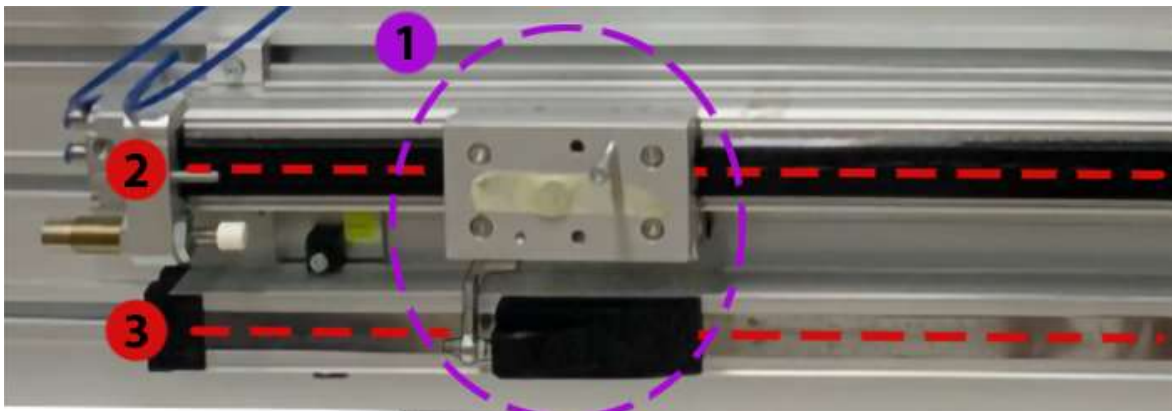
- Adquisición de la variable posición de la corredera del actuador lineal en forma de señal de voltaje para su tratamiento y conversión a unidad de longitud.
- Uso de un PLC para la recepción de datos y variables del sistema, control sobre los actuadores y, además, tener un medio de comunicación con una HMI.
- Elementos de mando e indicación para el control y monitoreo del sistema.
- Programación de una rutina PID para el control de la variable posición de la corredera del actuador neumático

### Adquisición variable posición

Para la adquisición de la posición del pistón se emplea un potenciómetro lineal montado como se muestra en la Figura 46.

### Figura 46

*Adquisición de variable posición.*



*Nota.* 1) Unión corredera de actuador lineal con corredera de potenciómetro lineal, 2) Trayectoria corredera de actuador lineal, 3) Trayectoria corredera de potenciómetro lineal.

El potenciómetro lineal empleado es el MLO-POT-450-TLF mostrado en la Figura 40, este potenciómetro tiene una longitud activa de 450 mm con resolución de 0.001mm. Soporta una velocidad de desplazamiento de 10 m/s y una aceleración de 200 m/s<sup>2</sup>.

Sus características eléctricas permiten una alimentación de voltaje máximo de 42 V lo cual produce una corriente máxima de 4 mA (Festo AG & Co, 2023).

Este potenciómetro de carrera igual que el actuador lineal es alimentado con 10 VDC con el fin de que los valores de salida se encuentren en ese rango, esto es importante ya que la entrada analógica del PLC admite valores en el rango [0:10] V, la señal de salida del potenciómetro es medida por una entrada del PLC y transformada en distancia.

### **Programación del PLC**

El PLC Siemens S7-1200 mostrado en la Figura 41 es el encargado de controlar las acciones que realiza el sistema, en la Tabla 3 se muestran sus características principales.

Ya que para el control de la válvula proporcional distribuidora se requiere de una señal analógica es necesario usar un módulo en conjunto con el PLC descrito. El módulo empleado es el 6ES7232-4HA30-0XB0 marca Siemens mostrado en la Figura 47.

### **Figura 47**

*Módulo de salida analógica 6ES7232-4HA30-0XB0 Siemens.*



*Nota.* Tomado de *Data sheet 6ES7232-4HA30-0XB0* [Archivo PDF] (p. 1), por Siemens AG, 2023. <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/es/Catalog/Product/6ES7232-4HA30-0XB0>

**Tabla 3**

*Características Principales PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC.*

Alimentación	
Voltaje de entrada	24 VDC
Corriente de entrada	500 mA
Corriente de interrupción	12 A
Entradas	
Digitales	14 Integradas, 6 HSC (High Speed Counting)
Voltaje nominal	24 V
Analógicas	2 Integradas
Rango de entrada analógica	[ 0 : 10 ] V
Salidas	
Digitales	10 Integradas, 4 PTO (100 kHz Pulse Train Output)
Voltaje Nominal	Valor "0": 0.1 V Valor "1": 20 V
Corriente de Salida	0.5 A max
Analógicas	0 Integradas
Funciones Integradas	
Controlador PID	Sí

*Nota.* Es importante notar que este modelo de PLC no tiene integrada ninguna salida analógica.

Adaptado de *Data sheet 6ES7214-1AG40-0XB0* [Archivo PDF] (p. 1-5), por Siemens AG, 2023,

<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7214-1AG40-0XB0>

En la Tabla 4 se muestran las características del módulo de salida analógica empleado.

**Tabla 4**

*Características Principales 6ES7232-4HA30-0XB0 Siemens.*

Alimentación	
Potencia	1.5 W
Corriente de entrada	15 mA
Salidas	
Análoga	1
Rango de voltajes	[ -10 : 10 ] V

*Nota.* Adaptado de *Data sheet 6ES7232-4HA30-0XB0* [Archivo PDF] (p. 1-2), por Siemens AG, 2023, <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/es/Catalog/Product/6ES7232-4HA30-0XB0>

La programación del PLC fue realizada en lenguaje Ladder y ejecuta las siguientes tareas:

- Recepción de variable Posición como señal eléctrica proveniente del potenciómetro lineal.
- Recepción de Variable set-point del sistema proveniente de una perilla (potenciómetro angular), dicho potenciómetro es alimentado con 10VDC al igual que el empleado para la adquisición de la variable posición. La señal eléctrica es interpretada y escalada para representar valores de entre 50 y 400 mm con el fin de evitar el ingreso de un valor de set-point correspondiente a una zona donde la corredera esté en contacto con los muelles ubicados en los extremos del actuador lineal.
- Accionamiento de la válvula proporcional direccional con un módulo de salida análoga, los valores de entrada que admite la válvula están en un rango admisible con los valores de escritura permitidos para la salida análoga, el valor que esta salida tomará es regido por el controlador PID implementado.
- Control PID de posición de la corredera del actuador lineal.

- Paro y arranque del proceso, para esta tarea se conecta una de las entradas digitales a un selector mecánico que será accionado por el operario, cuando la opción “Stop” sea seleccionada, el sistema no permitirá el movimiento del actuador neumático, por otro lado, si la opción “Run” es seleccionada el sistema controlará la posición de la corredera del actuador mecánico según un valor de set-point, ambos estados se evidenciarán mediante la activación de dos luces piloto de color rojo y verde respectivamente.
- Envío y recepción de datos con HMI, el PLC se encargará de enviar los valores de posición y set-point para ser mostradas en la interfaz, por otro lado, la interfaz enviará los valores de las constantes del controlador al PLC, esto con el objetivo de darle la opción al operario de modificar las características del controlador lo cual aporta al objetivo didáctico del proyecto.

La programación realizada se muestra en el Anexo A.

### **Diseño y construcción tablero eléctrico.**

Debido a los requerimientos del sistema, tratamiento de diferentes señales y el uso de diferentes elementos electrónicos, se resuelve diseñar un tablero eléctrico que: proteja elementos electrónicos, centralice el cableado de las diferentes conexiones, permita el montaje de la HMI y elementos de mando y que facilite la conexión y desconexión de elementos propios del laboratorio. El interior del tablero eléctrico se muestra en la Figura 48.

**Figura 48**

*Elementos internos de tablero eléctrico.*



Los elementos montados en el interior del tablero eléctrico se enuncian a continuación:

- Breaker de 10 amperios 2 polos.
- Módem Wifi.
- Convertidor Buck de voltaje.
- Relé de 24VDC.
- Cargador de Raspberry PI 2.5 amperios.
- Cargador de Módem Wifi.
- 20 borneras para cable 16 AWG
- 60cm de canaleta de 25x40mm.

En la Figura 49 se muestran los elementos montados en la parte frontal del tablero eléctrico y a los lados.

**Figura 49**

*Parte frontal del tablero eléctrico.*



*Nota.* 1) HMI, 2) Luces piloto, 3) Switch Stop-Run, 4) Perilla valor set-point, 5) Conectores banana hembra.

Los elementos montados en la parte frontal del tablero eléctrico y a sus lados se enuncian a continuación:

- Pantalla Táctil 3.5 pulgadas.
- Raspberry Pi 3B+
- Ventilador para Computador.
- 2 luces piloto.
- Perilla.
- Switch Selector.
- 32 conectores banana, 16 del lado izquierdo y 16 en la parte inferior



## Comunicación de dispositivos

Debido a los requisitos específicos del sistema, es esencial establecer un medio de comunicación entre el PLC S7-1200 y la Raspberry Pi, que desempeña el papel de Interfaz Humano-Máquina (HMI). Esta comunicación facilita la visualización y el control efectivo del sistema. Además, es crucial reconocer la importancia de integrar un dispositivo que permita la conectividad fluida entre los diversos componentes, incluyendo el PLC, la Raspberry Pi y el PC.

En este contexto, el dispositivo de elección para lograr esta conectividad podría ser tanto un switch como un router. Sin embargo, al considerar el crecimiento futuro del proyecto y la necesidad de implementar una comunicación inalámbrica, se ha tomado la decisión de incorporar un router en la arquitectura.

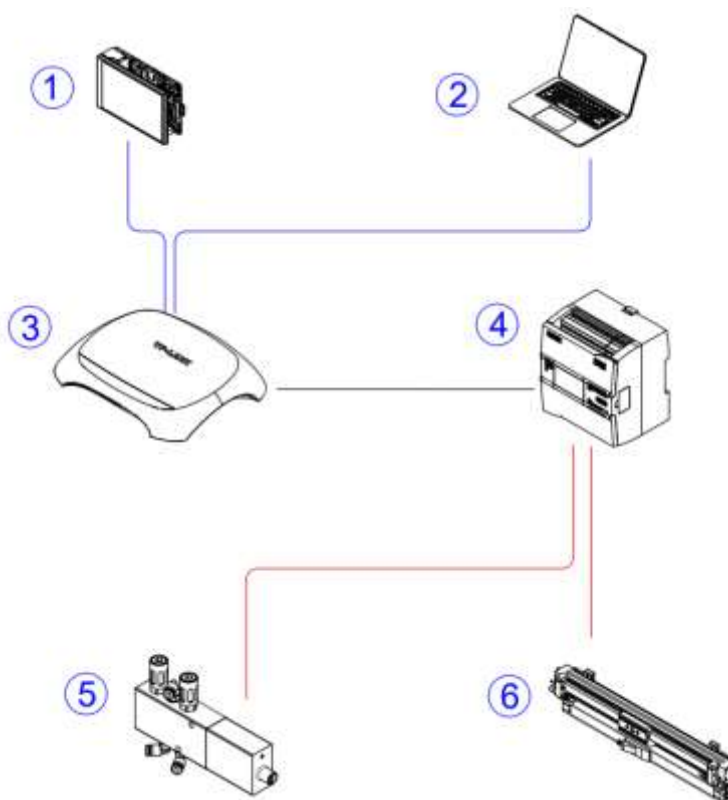
Un router es un dispositivo de red altamente versátil que tiene la capacidad de establecer conexiones entre diferentes tipos de redes y dirigir de manera inteligente el flujo de datos entre ellas, su papel es significativo en sistemas que involucran componentes heterogéneos y requieren una comunicación efectiva entre ellos. Al adoptar un router en esta implementación, se garantiza que el PLC, la Raspberry Pi y un PC (usado para la realización de experimentos y pruebas) puedan comunicarse de manera eficiente y segura a través de una red.

Esta elección estratégica de incorporar un router no solo satisface las necesidades actuales del sistema, sino que también considera su evolución a futuro. La escalabilidad del proyecto se ve beneficiada por la capacidad del router para manejar un crecimiento gradual en la red, así como la posibilidad de implementar conexiones inalámbricas, lo que proporciona una mayor flexibilidad en la ubicación de los dispositivos y la adaptación a futuros cambios en los requerimientos de comunicación.

Con los antecedentes mencionados anteriormente, se implementa la arquitectura de comunicación mostrada en la Figura 50.

**Figura 50**

*Arquitectura de Comunicación.*



*Nota.* Arquitectura de comunicación implementada en el proyecto, donde: 1) Raspberry Pi, 2) PC, 3) Router, 4) PLC S7-1200, 5) Válvula proporcional direccional, 6) Potenciómetro lineal, línea azul: comunicación Modbus TCP, línea negra: comunicación Ethernet IP y línea roja: Cableado duro.

En la Figura 50, se puede visualizar las conexiones para obtener la comunicación entre los dispositivos. En la Tabla 5, se puede apreciar la dirección IP configurada a cada dispositivo con mascara de 255.255.255.0.

**Tabla 5**

*Dirección IP de los dispositivos.*

<b>Dispositivo</b>	<b>Dirección IP</b>
Router	192.168.0.1
PLC s7-1200	192.168.0.5
PC	192.168.0.10
Raspberry PI	192.168.0.100

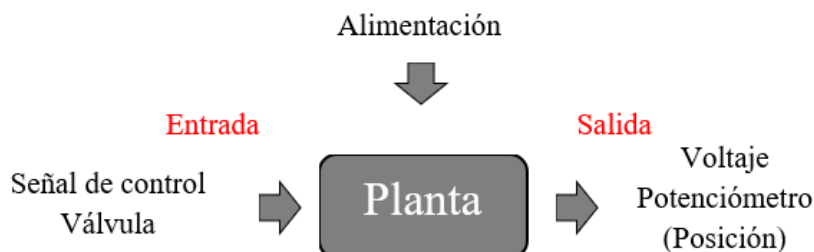
Con la arquitectura mostrada anteriormente se realizaron pruebas de envío y recepción de datos entre los diferentes elementos que conforman el sistema. Con los resultados obtenidos se concluye que el menor tiempo de escaneo en el cual se mantiene un comportamiento estable es de 0.05 segundos.

### **Definición de la planta.**

La planta para este trabajo será considerada como el conjunto: válvula proporcional direccional, actuador y potenciómetro lineales, estos elementos al ser acoplados forman un sistema que actúa como un solo bloque con una entrada y una salida, el mismo se muestra en la Figura 51.

**Figura 51**

*Entrada y salida del conjunto: válvula neumática, actuador y potenciómetro lineales.*



El bloque definido como planta tiene como entrada una señal de voltaje DC de valores [0:10] V (señal de control a la válvula proporcional direccional) y como salida una señal de voltaje DC de valores [0:10] V (señal entregada por el potenciómetro lineal), ya que la conversión de la señal de salida de voltaje a distancia permitirá tener una idea más clara de la respuesta del sistema, se trabajará con dicha conversión, por lo que la salida del sistema se redefine como un valor de posición de valores en el rango [0:450] mm.

La Alimentación del sistema se refiere a las señales de suministro de voltaje para la válvula proporcional (24VDC) y el potenciómetro lineal (10VDC), y la señal de suministro de presión de aire para la válvula proporcional direccional (6 Bar). Ya que estos no serán variados y se usarán sus valores nominales, no serán tomados en cuenta en el análisis.

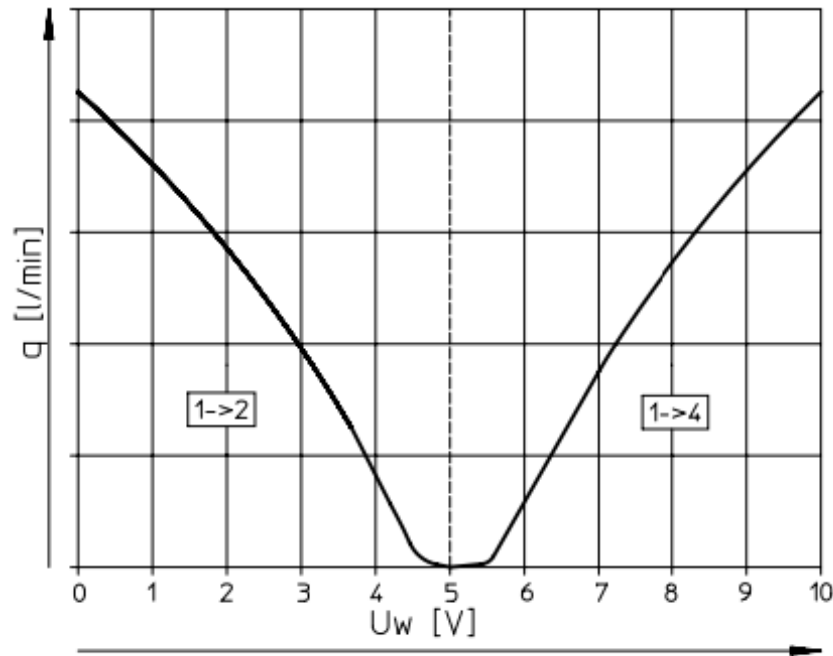
Modelar un sistema como un bloque del que se conoce su entrada y su salida permite identificar las características del mismo sin necesidad de conocer de forma exhaustiva la naturaleza del mismo (Landau & Zito, 2006). Si bien este método es normalmente usado para sistemas de los que se conoce poco o nada, es prudente emplearlo en este caso ya que se vuelve muy complicado modelarlo teóricamente. A pesar de lo mencionado anteriormente es fructífero conocer el funcionamiento de los elementos que conforman la planta.

En la Figura 52 se muestra la curva de respuesta de la válvula proporcional distribuidora MPYE-5-1/8-HF-010-B.

Los valores de tensión de entrada determinan la apertura de las vías de la válvula, el rango de entrada es [0.00:10.00] V, donde 0 V coloca a la válvula en apertura total para el flujo de 1 a 4, por otro lado, 10V coloca a la válvula en apertura total para el flujo de 1 a 2. Los valores intermedios de estos rangos colocan a la válvula en apertura parcial de la vía correspondiente. Como acotación, un voltaje de 5.00V cierra ambas vías, aunque existirán pequeñas fugas residuales (Festo AG & Co, 2021).

**Figura 52**

Caudal de salida en las vías (1 a 2) y (1 a 4) en función del voltaje de entrada.



*Nota.* Tomado de *Proportional directional control valves MPYE* [Archivo PDF] (p. 6), por Festo AG & Co, 2021, [https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id\\_MPYE\\_1/?page=0](https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id_MPYE_1/?page=0)

### **Consideraciones de la planta**

Al tener conocimiento sobre el funcionamiento de los elementos que conforman el conjunto "Planta" (válvula proporcional direccional, actuador lineal, potenciómetro lineal), es válido mencionar algunas observaciones:

- La válvula proporcional tiene una zona muerta para los valores de entrada alrededor del rango [4.50:5.50] V, este rango puede ser observado en la Figura 52.
- La válvula proporcional muestra un comportamiento muy cercano a un lineal fuera de su zona muerta.

- La planta está centrada en 5V (voltajes mayores causarían que la corredera se mueva en un sentido y voltajes menores causarían que se mueva en sentido contrario), ya que la respuesta de la función de control PID está centrada en un valor de cero es factible centrar a cero voltios a la planta mediante algunas operaciones aritméticas.
- Las secciones transversales de las cámaras de aire del pistón son iguales a lo largo del actuador por lo que a presión constante la velocidad del pistón es constante (Festo AG & Co, 2003).
- La corredera al llegar a los extremos de la carrera del pistón es detenida por los muelles colocados lo cual satura la salida en aproximadamente 40 y 420 mm.

Tomando en cuenta las observaciones anteriores se puede afirmar la siguiente hipótesis: Mientras el sistema no se encuentre en saturación por los muelles y despreciando la zona muerta de la válvula proporcional al ser pequeña en relación con la zona lineal, la planta puede ser descrita por un modelo lineal con un alto grado de aproximación. Esta hipótesis será verificada al probar diferentes modelos para representar a la planta.

### **Reducción banda muerta**

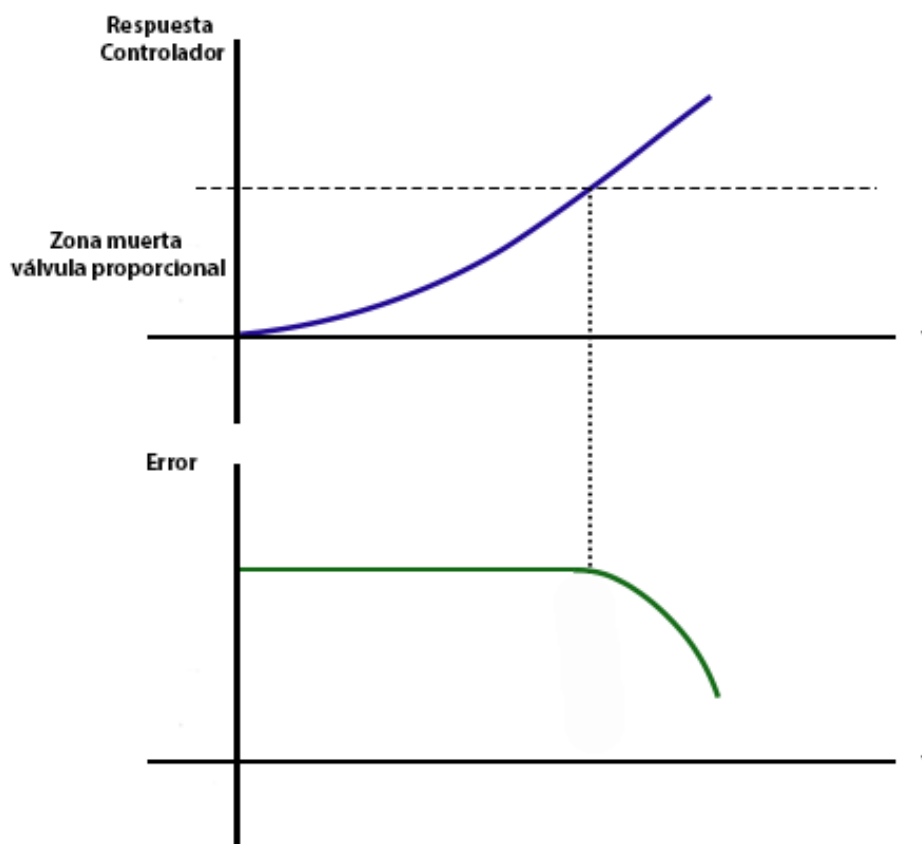
Tras realizar varias pruebas preliminares con constantes arbitrarias para el controlador se observó que el mismo tenía una corrección lenta cuando la respuesta del sistema se encontraba cerca del valor de set-point (errores pequeños), esto se debe a que, para errores pequeños el controlador tiene como respuesta valores pequeños que entran en la zona muerta de la válvula proporcional direccional y por consiguiente no generan una respuesta en el actuador lineal.

La acción integral del controlador provoca que su respuesta, al no generar un cambio en la posición de la corredera del actuador lineal, es incrementada a lo largo del tiempo hasta generar una respuesta lo suficientemente grande como para provocar una corrección en la

posición de la corredera. El tiempo que le toma al controlador salir de la zona muerta es directamente proporcional a la amplitud de esta y, por consiguiente, puede ser reducido si se reduce el rango de la zona muerta digitalmente. Este fenómeno se muestra de forma gráfica en la Figura 53.

### Figura 53

*Comportamiento del error para valores pequeños en la respuesta del controlador.*



*Nota.* El valor del error se mantiene constante hasta cuando la respuesta del controlador logra salir de la zona muerta de la válvula proporcional direccional.

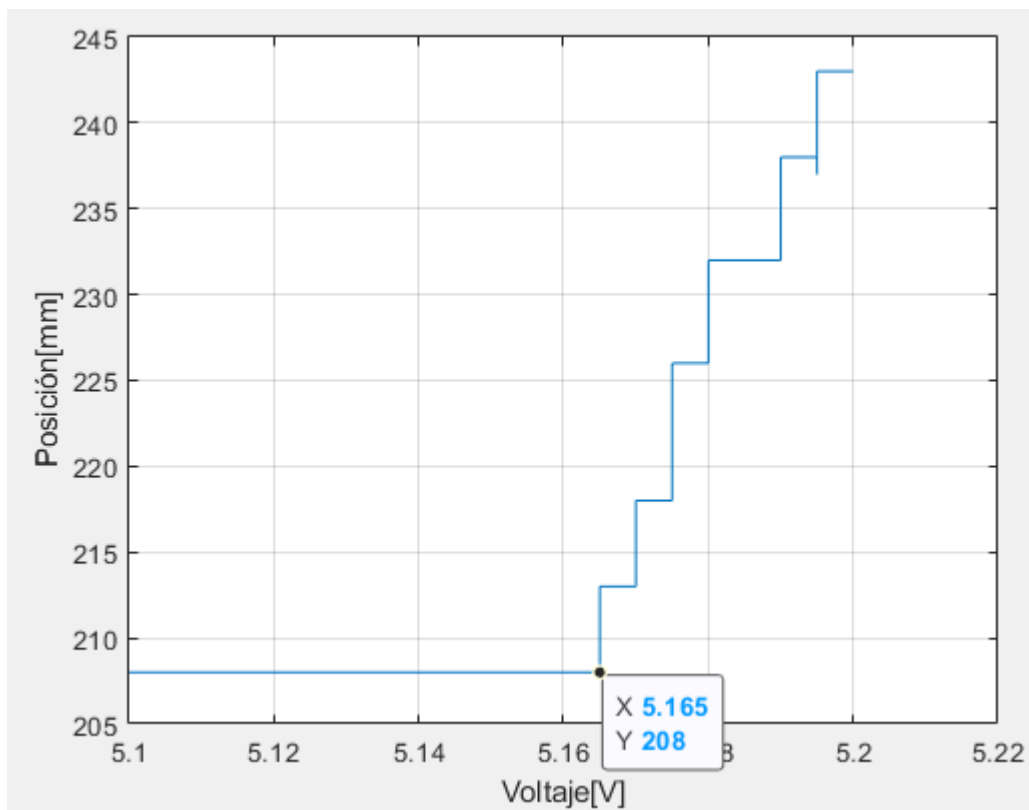
Por lo mencionado anteriormente se resuelve hacer una reducción de la banda muerta de la válvula proporcional direccional de forma digital mediante una operación aritmética, para ello se debe primero identificar con exactitud el rango de la zona muerta de la planta, para ello se excita al sistema con una señal rampa en búsqueda del mínimo valor que genere una respuesta del actuador lineal.

### ***Rampa con pendiente positiva***

Para encontrar el límite superior de la zona muerta se excita a la planta con una señal rampa con pendiente positiva esta señal parte de 5.1V a un máximo de 5.2V en un tiempo de 30 segundos. Los resultados obtenidos de excitar a la planta con dicha señal se muestran en la Figura 54.

### **Figura 54**

*Resultados prueba de rampa positiva.*



*Nota.* Se detalla el punto donde el voltaje de entrada genera una respuesta en el sistema.

En la Figura 54 se puede ver que la corredera del actuador neumático empezó a moverse en el tiempo correspondiente a un valor de voltaje de entrada de 5.165V, por lo cual se define el límite superior de la banda muerta como 5.15V

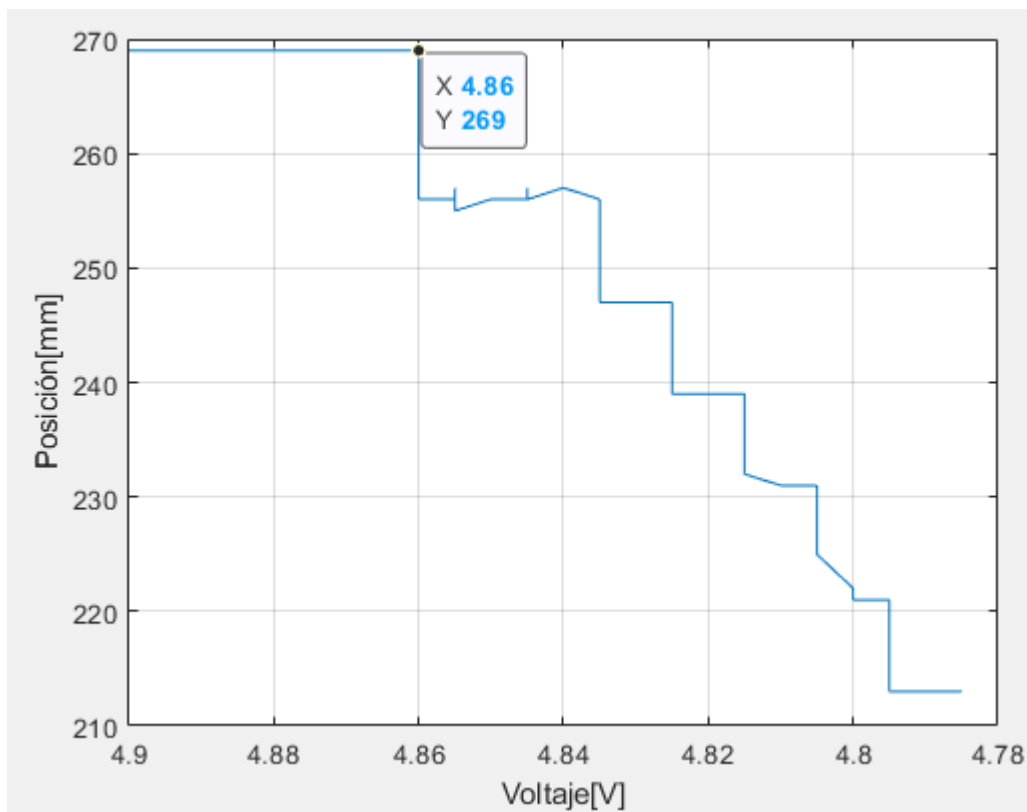


### **Rampa con pendiente negativa**

Para encontrar el límite inferior de la zona muerta se excita a la planta con una señal rampa con pendiente negativa esta señal parte de 4.9V a un mínimo de 4.7V en un tiempo de 60 segundos. Los resultados obtenidos de excitar a la planta con dicha señal se muestran en la Figura 55.

### **Figura 55**

*Resultados prueba de rampa negativa.*



*Nota.* La gráfica tiene el eje de voltaje invertido ya que se empezó por un voltaje de 4.9, el cual fue reduciéndose a lo largo de la prueba. Se detalla el punto donde el voltaje de entrada genera una respuesta en el sistema.

En la Figura 55 se puede ver que la corredera del actuador neumático empezó a moverse en el tiempo correspondiente a un valor de voltaje de entrada de 4.86V, por lo cual se define el límite superior de la banda muerta como 4.85V.

### **Algoritmo para reducción banda muerta**

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.

Es importante notar que la salida del controlador será limitada a valores que eviten que este algoritmo escriba valores de voltaje fuera del rango de trabajo de la válvula proporcional, a su vez, restringiendo el uso de valores de la zona muerta de la misma.

Como acotación se menciona que este proceso provoca, además, evitar las no-linealidades introducidas por la banda muerta (Kara & Eker, 2004), en consecuencia, mejorará el ajuste de la planta a un modelo lineal.

### **Centrado en valor cero a la planta**

Ya que el sistema tiene acción en ambos sentidos (el actuador lineal es de doble efecto) el controlador tendrá una acción de control en ambos sentidos (respuesta puede tomar valores positivos y negativos) centrada en un valor de cero. 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.

Para solventar este inconveniente se resuelve añadir en la programación del PLC una adición de 4.85 al valor de respuesta del controlador. De esta forma, el controlador al enviar un valor de -4.85 (límite inferior) provocará la escritura de 0V lo cual representa una apertura total a una vía de la válvula, al enviar un valor de 0 provocará la escritura de 4.85V lo cual representa un cierre de ambas vías y al enviar un valor de 4.85 (límite superior) provocará la

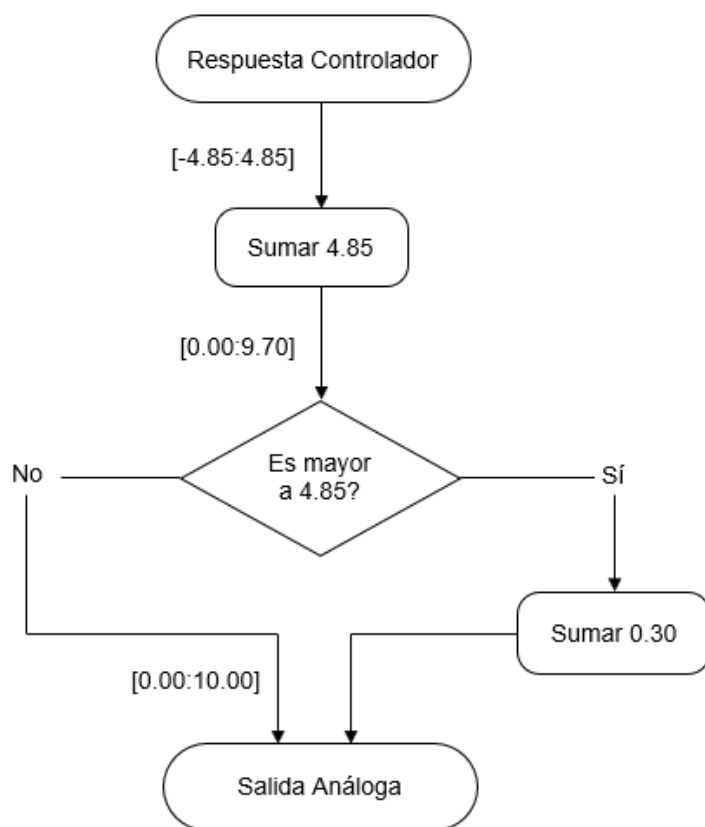
escritura de 9.70V lo cual representa una apertura total de la otra vía de la válvula (Planta tras la reducción de la zona muerta).

### Identificación planta

En la Figura 56 se muestra un diagrama de flujo que resume el proceso sometido a la respuesta del controlador hasta la escritura en la salida análoga.

### Figura 56

*Diagrama de flujo de la escritura del valor de control.*



*Nota.* En cada línea de flujo se muestra el rango en el cual se encuentran los valores. La respuesta del controlador es sometida a diferentes operaciones para que finalmente sea un valor entre 0 y 10 V, el cual es admisible por la válvula proporcional.

Antes de definir el proceso para la identificación de la planta, se debe tomar en cuenta los cambios realizados en los procesos de Reducción de banda muerta y Centrado en valor cero a la planta, ya que, si bien estos procesos no cambian las propiedades internas del conjunto planta definido anteriormente, sí cambian la forma en que el controlador a implementar observa a dicha planta.

En la Figura 56 se observa que la salida del controlador tiene un rango de  $[-4.85:4.85]$  por lo que la planta que observa el controlador tiene esos valores de entrada. En otras palabras, al conjunto planta definido anteriormente se le debe agregar los procesos de Reducción de banda muerta y Centrado en valor cero.

### ***Definición del experimento***

El experimento a realizar consiste en excitar al sistema con una señal de voltaje conocida (PRBS) y tomar datos de la respuesta de la planta a dicha señal, posteriormente estos datos se ingresarán con la función de identificación de sistemas (función adaptativa de estimación de parámetros) de un software de simulación numérica la cual, mediante el conjunto de datos del experimento y el tipo de modelo que se solicite, entrega una estimación de los parámetros del modelo de la planta, este proceso es iterativo ya que se busca el modelo que describa de forma más aproximada a la planta.

Antes de continuar con la realización del experimento es importante aclarar que se tratará de evitar en medida de lo posible emplear datos obtenidos cuando la corredera está en contacto con alguno de los muelles ubicados en los extremos, esto debido a que el objetivo de estos experimentos es caracterizar a la planta en funcionamiento nominal y no a su comportamiento cuando la corredera del actuador lineal está en contacto con dichos muelles.

Para lograr cumplir con este requerimiento se emplean amplitudes lo suficientemente pequeñas y tiempos de conmutación de las señales lo suficientemente cortos.

### **Excitación con PRBS**

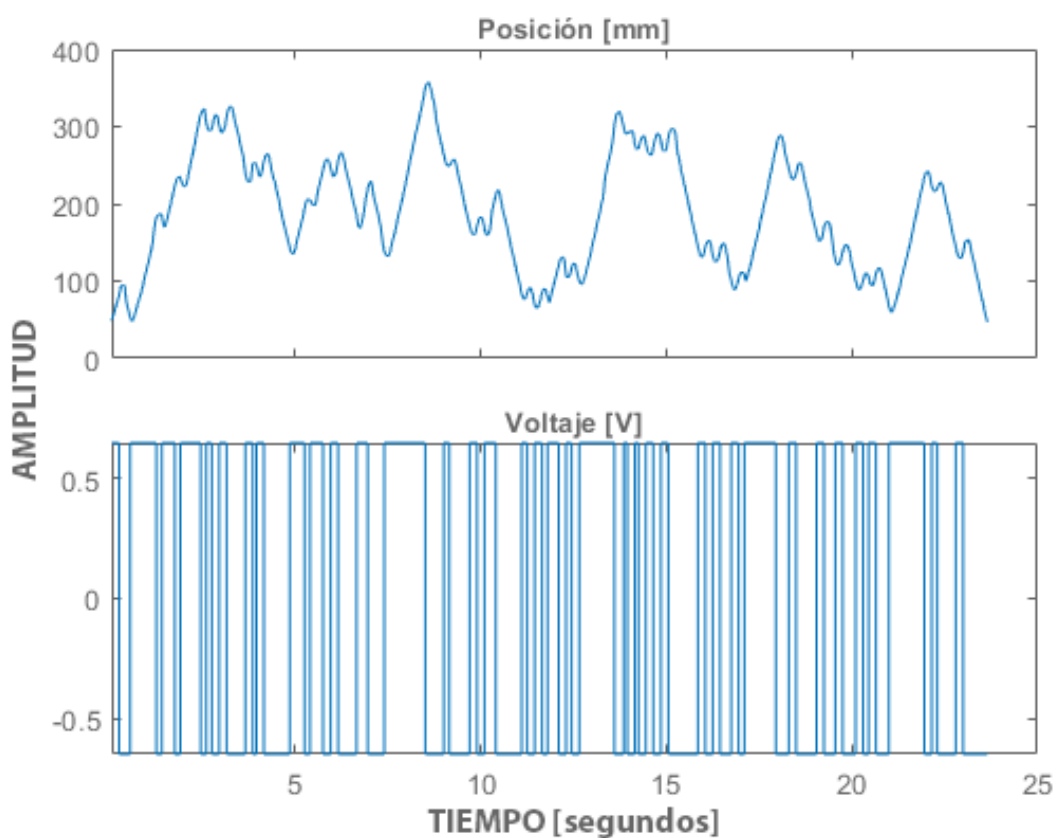
Un PRBS es empleado debido a ser una señal rica en frecuencias y ser replicable en caso de una pérdida de datos.

Esta prueba se realizó con un PRBS generado de una función con 255 pulsos con amplitud de 1.3 y un tiempo de conmutación de 0.15s, ya que el tiempo de muestreo del sistema es 0.05s se tienen 3 muestras por pulso.

De las mediciones obtenidas se tomó un intervalo de tiempo donde la corredera no chocó con los muelles laterales, estos resultados se muestran en la Figura 57.

### **Figura 57**

*Resultados excitación con PRBS.*



*Nota.* En la parte superior se muestra la respuesta de la planta a la señal de excitación, en la parte inferior se muestra la señal PRBS empleada.

### ***Estimación del modelo de la planta***

A continuación, se introducen el 80% de los datos (datos de entrenamiento) en la herramienta de identificación de sistemas del software de simulación numérica, se prueban varios valores para: número de polos, número de ceros y retardo a la respuesta, se evalúan los porcentajes de ajuste de los diferentes modelos a los datos ingresados y se elige la configuración más apropiada.

En la Tabla 6 se muestran los diferentes modelos con sus porcentajes de ajuste.

**Tabla 6**

*Porcentaje de ajuste para diferentes modelos en la identificación con PRBS.*

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

*Nota.* El orden de cada modelo es la suma del número de ceros y polos.

El criterio para la elección del modelo es escoger el de menor orden y retardo, y cambiarlo por uno de mayor orden o retardo si aumenta en por lo menos uno en su porcentaje

de ajuste. Realizando esto se concluye que el modelo más adecuado es aquel que tiene: número de polos = 2, número de ceros = 1 y retardo = 0 con un ajuste del 93.6%.

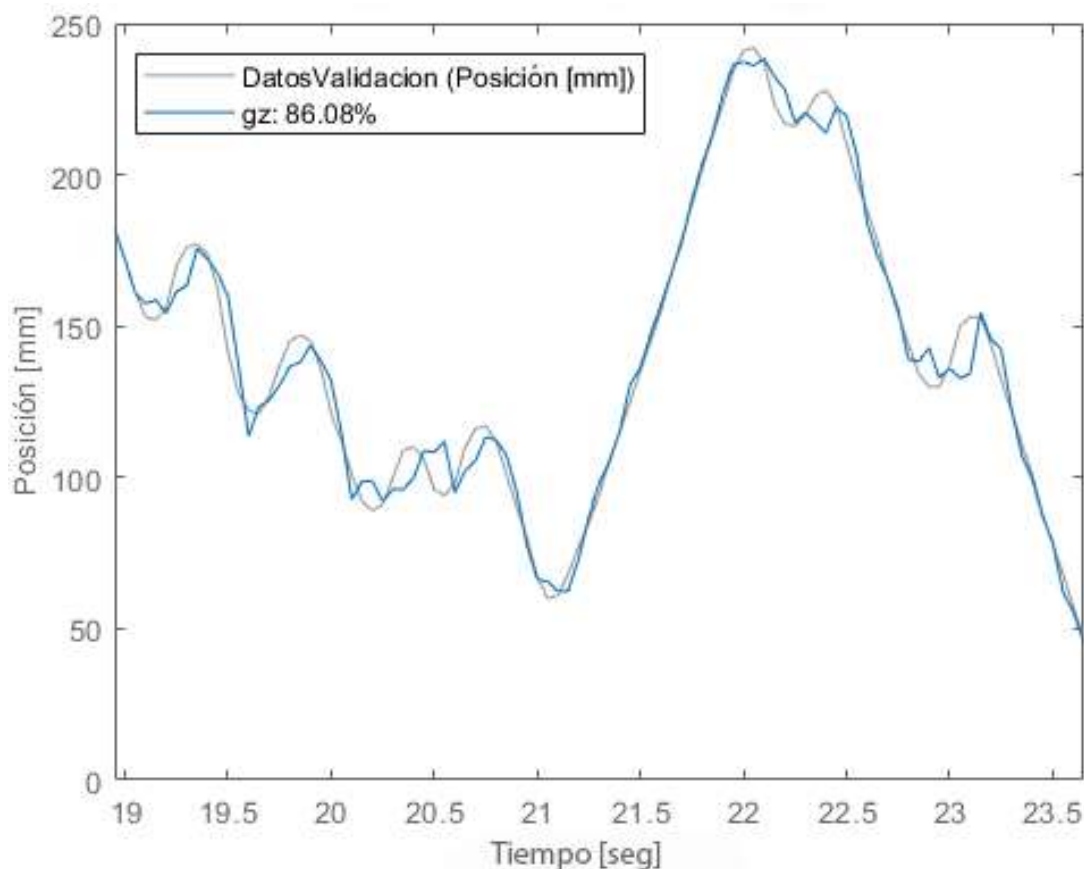
El modelo escogido corresponde a la siguiente función de transferencia “gz” en tiempo discreto mostrada en la ecuación (44):

$$gz = \frac{6.108z}{z^2 - 1.692z + 0.6922} \quad (44)$$

Con la función de transferencia obtenida se comprueba su ajuste al 20% de los datos no usados para el entrenamiento (datos de validación), la gráfica obtenida de esta validación se muestra en la Figura 58.

**Figura 58**

*Validación función de transferencia obtenida en prueba con PRBS.*



La validación arroja un resultado de 86.1% de ajuste, por lo cual la identificación con PRBS es correcta.

### Definición de características de desempeño

Ya que uno de los objetivos de este proyecto es implementar un sistema neumático con control PID de la posición de un actuador lineal en el laboratorio de neumática e Hidráulica de la Universidad (objetivo centrado en la utilidad didáctica del proyecto), al no tener una aplicación industrial específica no se tienen parámetros específicos con los cuales establecer los criterios para el diseño del controlador, por ello se definen arbitrariamente las siguientes características de diseño:

- Error en estado estable menor al 1% de la carrera total del actuador lineal (4.5mm).
- Comportamiento del controlador, enfocado en la velocidad de respuesta.

Debido a la última característica de desempeño se antepondrá un tiempo bajo de respuesta a las demás propiedades del controlador.

### Sintonización controlador PID

Se desea implementar un controlador PID de forma que el sistema visto como funciones de transferencia tenga el esquema mostrado en la Figura 59, cabe destacar que se ha multiplicado el sistema original por una ganancia de  $K=0.05$  con el objetivo de asegurar la estabilidad del controlador. La sintonización se lleva a cabo mediante el método de ubicación de polos en tiempo discreto. Se conoce que un controlador PID en tiempo discreto está representado por la ecuación (45).

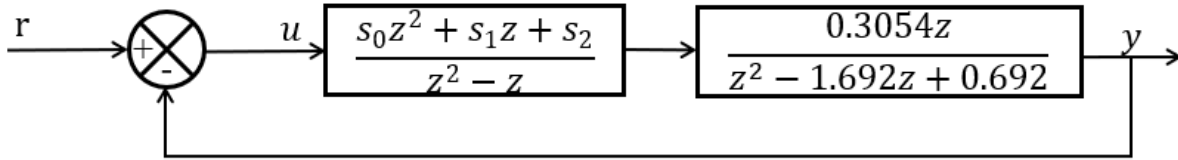
$$C(z) = \frac{s_0 z^2 + s_1 z + s_2}{z^2 - z} \quad (45)$$

El polinomio característico del sistema de la Figura 59 se describe en la ecuación (46).



**Figura 59**

Diagrama de bloques del sistema controlado por un controlador PID



$$z^4 + (0.3054 * s_0 - 2.692)z^3 + (0.3054 * s_1 + 2.384)z^2 + (0.3054 * s_2 - 0.692)z = 0 \quad (46)$$

La ecuación (46) se obtuvo de la multiplicación de las ecuaciones (45) y (44).

La ecuación característica general de un sistema se presenta en la ecuación (47). Se ha determinado que la frecuencia natural del sistema, obtenida mediante el uso de software de simulación numérica, es de 7.34 rad/s.

$$z^4 + (\alpha_d + p_1)z^3 + (p_1\alpha_d + p_2)z^2 + (p_2\alpha_d + p_3)z + p_3\alpha_d = 0 \quad (47)$$

Donde:

$\alpha_d$ : Es el polo deseado del sistema controlado, el cual debe ubicarse dentro del círculo unitario.

$p_1, p_2, p_3$ : Son los coeficientes del polinomio característico de un sistema de tercer orden conocido por las características de desempeño.

Antes de obtener la ecuación característica general de un sistema, es necesario definir las características de desempeño deseadas para el sistema controlado, en este caso, se busca que el sistema controlado sea al menos tres veces más rápido que el sistema sin controlar, lo que implica una nueva frecuencia natural de 2.447 rad/s y un coeficiente de amortiguamiento de 0.9.

Igualando las ecuaciones (46) y (47), igualando coeficientes del mismo orden y formando un sistema de ecuaciones de cuatro incógnitas se obtiene los parámetros del controlador PID vistos a continuación.

$$s_0 = 1.8684, s_1 = -3.2323, s_2 = 1.3932 \text{ y } \alpha_d = 0$$

Se observa que el polo deseado se encuentra dentro del círculo unitario lo cual indica que el sistema controlado es estable.

El controlador PID en tiempo discreto con los coeficientes obtenidos se representa por la ecuación (48).

$$C(z) = \frac{1.8684z^2 - 3.2323z + 1.3932}{z^2 - z} \quad (48)$$

Ensamblando el controlador en tiempo discreto se obtienen los parámetros del PID estándar, estos parámetros se presentan a continuación.

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

### ***Ajuste fino de constantes controlador PID***

Al ingresar las constantes obtenidas anteriormente se observa el comportamiento del sistema, se obtienen las siguientes observaciones:

- La respuesta del sistema tiene sobrepasos elevados para cambios grandes en el valor de set-point.
- La velocidad de corrección del error es adecuada.
- El sistema oscila un poco al momento de llegar a valores pequeños de error.

Al tomar en cuenta estas observaciones se resuelve reducir un poco “ $K_p$ ” y aumentar un poco “ $T_d$ ” para reducir las oscilaciones y reducir en buena cantidad “ $T_i$ ” para reducir el sobrepaso. Partiendo de esas premisas se realizó el proceso iterativo de prueba y error en la modificación de los parámetros llegando a los siguientes parámetros finales:

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

- La reducción de “ $K_p$ ” provoca la disminución de las oscilaciones.
- La reducción de “ $T_i$ ” provoca un menor sobrepaso.
- “ $T_d$ ” se mantiene prácticamente igual, su ligera reducción contribuye a la disminución del sobrepaso.

### **Algoritmo de error admisible**

Ya que la corredera al no poder deslizarse suavemente distancias cortas, se resuelve agregar una secuencia al código en el PLC con el fin de que el controlador sea apagado al momento de alcanzar un error menor a 4mm con respecto al valor de set-point, es decir, el sistema toma como error admisible cualquier valor de 0 a 4mm o lo que corresponde a 0.89% de la carrera total del actuador.

Esto evita que la corredera al alcanzar valores pequeños de error que se consideran despreciables continúe moviéndose debido a la naturaleza de la acción integral de acumular el error a través del tiempo.

### **Diseño HMI**

Para la implementación de la pantalla donde se mostrará la interface se emplea una pantalla táctil UCTRONICS de 3,5 pulgadas mostrada en la Figura 60. Esta pantalla tiene unas dimensiones de 55.98 x 85.60 mm y una resolución de 480 x 320 pixeles (UCTRONICS, s.f.).

La pantalla mostrada es controlada desde una Raspberry Pi, la cual es una computadora de placa única, de pequeñas dimensiones y bajo costo. Tiene aproximadamente el tamaño de una tarjeta de crédito y consta de un sistema en un chip (SoC) que integra un procesador, memoria e interfaces de entrada/salida en una sola placa de circuito. Por lo general, ejecuta una variante del sistema operativo Linux y se puede conectar a un monitor, teclado y ratón, como una computadora de escritorio normal (Raspberry Pi, 2018).

En la Figura 61 se muestra el modelo de placa Raspberry Pi empleado.

**Figura 60**

*Pantalla Táctil de 3.5 pulgadas UCTRONICS.*



*Nota.* Tomado de *Pantalla Táctil de 3.5 pulgadas* [Fotografía], por UCTRONICS, s.f., <https://www.uctronics.com/uctronics-3-5-inch-hdmi-tft-lcd-display-with-touch-screen-touch-pen-3-heat-sinks-for-raspberry-pi-3-model-b-pi-2-model-b-pi-b.html>

**Figura 61**

*Raspberry Pi 3 Modelo B+*



*Nota.* Tomado de *Raspberry Pi 3B+* [Fotografía], por Raspberry Pi, 2018, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>

### ***Programación raspberry Pi***

Para trabajar con Raspberry se usa un sistema operativo que es una versión de Ubuntu llamada Raspbian, allí se realiza un programa en el lenguaje Python que realiza las tareas que se enuncian a continuación.

- Recibir los datos tomados por la pantalla táctil para el manejo del sistema.
- Comunicarse inalámbricamente con la red empleada 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 en la HMI.
- Enviar los parámetros del controlador (“Kp”, “Ti” y “Td”) en caso de ser modificados por el operador.

La comunicación entre el PLC y placa Raspberry será mediante el mismo protocolo y metodología que la empleada para comunicarse con la computadora con la cual se realizaron las pruebas.

### ***Implementación pantallas***

En la Figura 62 se muestra la pantalla de Inicio de la HMI, la cual tiene en la parte superior el logo de la Universidad de las Fuerzas Armadas, seguido del título del proyecto, los autores y el tutor. En la parte inferior están los botones de navegación de los cuales se ha seleccionado el de “INICIO”. El uso de esta pantalla es el de dar una introducción a la HMI y mostrar los autores de esta, la pantalla no tiene ningún elemento para interacción con el usuario.

**Figura 62**

*Pantalla de Inicio.*



En la Figura 63 se muestra la pantalla de Control de la HMI.

**Figura 63**

*Pantalla de Control.*



a)

b)

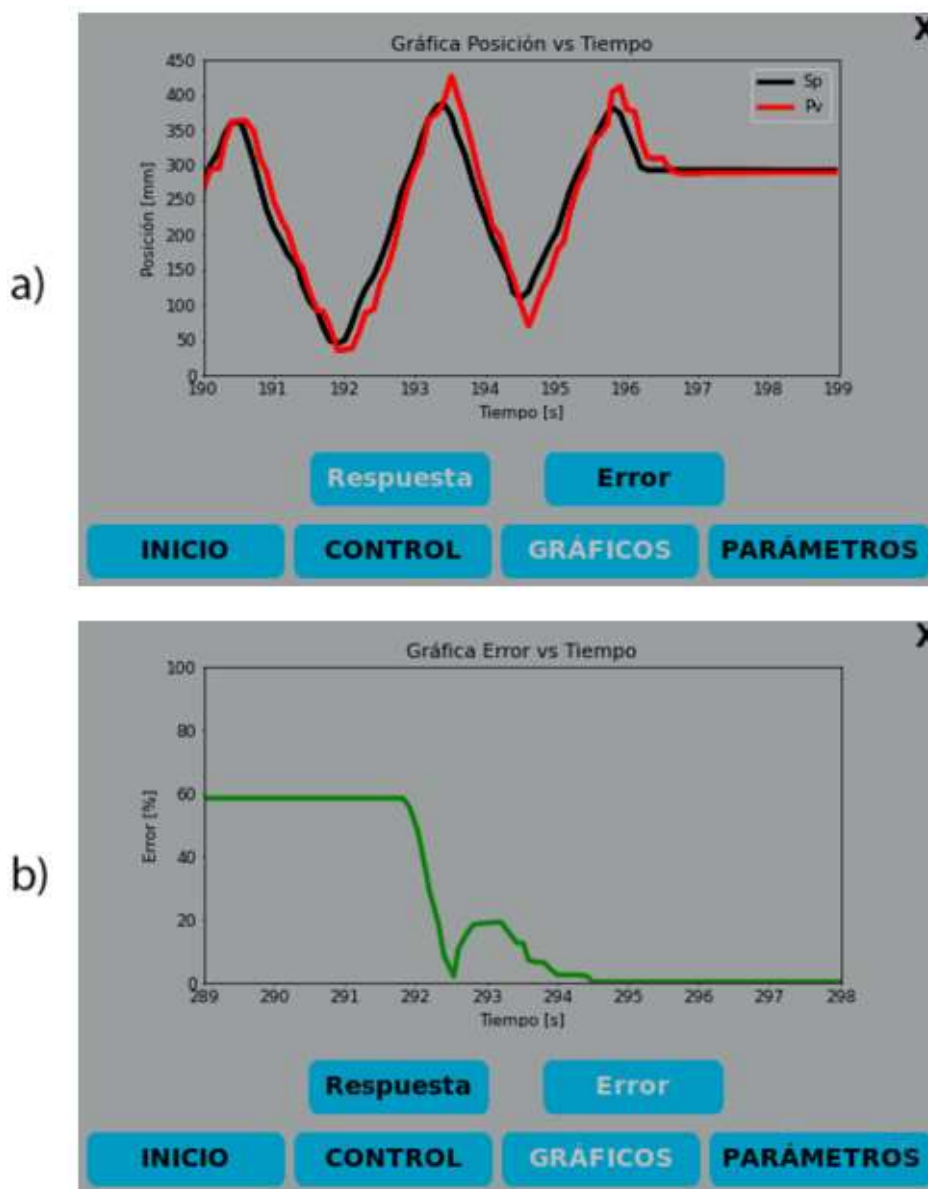
*Nota.* a) Pantalla de control cuando el valor de set-point es 178mm, b) Pantalla de control cuando el valor de set-point es 398mm.

La pantalla de Control tiene en la parte superior una simplificación del actuador lineal la cual se ajusta a la posición de la corredera del actuador real. En la mitad se muestran los valores "Sp" y "Pv", Set-Point (Consigna en español) y Position-Value (Valor de posición en español) en milímetros. En la parte inferior están los botones de navegación de los cuales se ha seleccionado el de "Control". El propósito de esta pantalla es la de la visualización del estado del sistema, esta pantalla no tiene ningún elemento para interacción con el usuario.

En la Figura 64 se muestra la pantalla de Gráficos de la HMI.

Figura 64

Pantalla de Gráficos.



*Nota.* a) Pantalla de gráficos cuando se selecciona la opción de “Respuesta”, b) Pantalla de gráficos cuando se selecciona la opción de “Error”.

La pantalla de Gráficos tiene el objetivo de mostrar las variables de estado del sistema a través del tiempo, sobre la barra de navegación se despliega una segunda barra de navegación en la cual se muestran dos opciones: Respuesta y Error. Al seleccionar “Respuesta” en la parte



superior se coloca el título de la gráfica y en medio se grafican las formas de onda del “Sp” y “Pv” a través del tiempo, en el eje de las ordenadas se representa la distancia en milímetros y en el eje de las abscisas el tiempo en segundos. Por otro lado, al seleccionar “Error” en la parte superior se coloca el título de la gráfica y en medio se grafica la forma de onda del error a través del tiempo, en el eje de las ordenadas se representa el valor de error en porcentaje y en el eje de las abscisas el tiempo en segundos. Los datos mostrados para ambas opciones cubren un intervalo de 10s.

En la parte inferior están los botones de navegación de los cuales se ha seleccionado el de “Gráficos”. Esta pantalla no tiene ningún elemento para interacción con el usuario además de la selección de la gráfica que se desea visualizar.

En la Figura 65 se muestra la pantalla de Parámetros de la HMI.

**Figura 65**

*Pantalla de Parámetros.*



La pantalla de Parámetros tiene el objetivo de permitir al usuario cambiar las características del controlador de forma que el personal docente y alumnado presente en el laboratorio de neumática e hidráulica puedan observar el cambio del comportamiento del sistema al alterar estos valores.

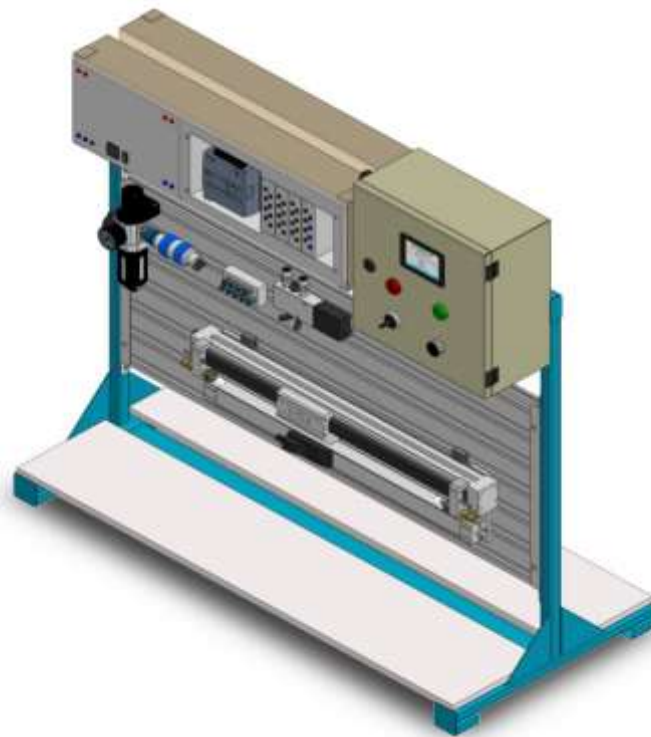
El usuario al seleccionar el parámetro que desea modificar ( $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) puede manipular los botones ubicados en la parte superior derecha para aumentar o disminuir el valor actual, tras ello debe presionar el botón “Cambiar” lo cual enviará las nuevas constantes al PLC. En el caso de desear regresar a las constantes por defecto (Constantes obtenidas del proceso de ajuste fino) se puede pulsar el botón “Reset” que realizará esta acción.

### **Integración de sistemas**

Una vez se ha diseñado he implementado los sistemas: neumático, medición y control y HMI, estos son montados en la estructura construida como se indica en la Figura 66.

### **Figura 66**

*Integración de sistemas.*



Los cables y mangueras necesarios para el funcionamiento son etiquetados y colocados de forma que estos no interfieran con los elementos de mando, ni con los movimientos del actuador.

## Capítulo IV

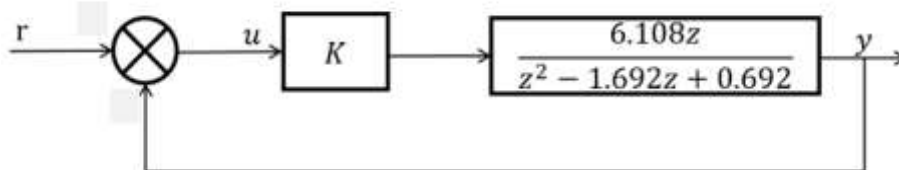
### Análisis y resultados

#### Análisis de estabilidad

Para el análisis de estabilidad de la planta encontrada se utiliza el método de Jury ya que el sistema encontrado está en tiempo discreto, además para realizar el análisis de estabilidad se debe aplicar una ganancia al modelo y en lazo cerrado como se muestra en la Figura 67.

**Figura 67**

*Diagrama de bloques del modelo encontrado para el análisis de estabilidad.*



El polinomio característico del sistema de la Figura 67 igualado a cero se describe en la ecuación (49).

$$z^2 - 1.692z + 0.692 + 6.108Kz = 0 \quad (49)$$

En la Tabla 7 se dispone la distribución de Jury del modelo encontrado.

**Tabla 7**

*Distribución de la prueba de estabilidad de Jury para el modelo encontrado*

$z^0$	$z^1$	$z^2$
0.692	$6.108K + 1.692$	1
1	$6.108K + 1.692$	0.692
$-1.88K - 0.521$	0	0

Comprobamos las condiciones de Jury.

Para la condición:  $F(1) > 0$

$$1^2 - 1.692 * 1 + 0.692 + 6.108K * 1 > 0$$

Despejando la ganancia se obtiene que:  $K > 0$

Para la condición:  $(-1)^n * F(-1) > 0$

$$1^2 + 1.692 * 1 + 0.692 - 6.108K * 1 > 0$$

Despejando la ganancia se obtiene que:  $K < 0.554$

Para la condición:  $|a_0| > a_n$

La condición se cumple ya que:  $1 > 0.692$

Para la condición:  $|b_0| > |b_{n-1}|$

$$|-1.88K - 0.521| > 0$$

Despejando la ganancia se obtiene que:  $\exists K \in [-\infty, +\infty]$

Por lo tanto, el sistema es estable para las condiciones de la inecuación (50).

$$0 < K < 0.554 \tag{50}$$

Cuando se aplica el control del sistema en un esquema de lazo cerrado, es esencial seleccionar un valor de "K" que se encuentre alejado del límite máximo del rango de valores posibles. Esto se hace para garantizar la estabilidad del sistema controlador. Una opción acertada sería elegir un valor de "K" que sea diez veces menor que el límite máximo, como en este caso, donde el valor empleado en el diseño del controlador sería  $K = 0.05$

### Análisis de controlabilidad

Para el análisis de controlabilidad se debe obtener las variables de estado del sistema, por lo que las variables de estado del sistema en la configuración de la Figura 27 se muestran a continuación.

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

La matriz de controlabilidad dada por la ecuación (31) para el modelo encontrado se representa en la ecuación (51).

$$C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1.692 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

La matriz de controlabilidad del sistema consta de dos variables de estado y tiene un rango de dos. Adicionalmente, su determinante es igual a uno. En consecuencia, podemos decir que el sistema modelado se puede controlar.

### **Análisis de observabilidad**

El análisis de observabilidad y el análisis de controlabilidad requieren la obtención de las variables de estado del sistema. La ecuación (52) representa la matriz de observabilidad proporcionada por la ecuación (34) para el modelo encontrado.

$$O_{bs} = \begin{bmatrix} 0.3054 & 0 \\ 0.5167 & -0.2114 \end{bmatrix} \quad (52)$$

La matriz de observabilidad del sistema posee un rango de dos y el sistema es de dimensión dos. Adicionalmente, su determinante es igual a -0.0646. Por lo que podemos decir que el sistema modelado se puede observar.

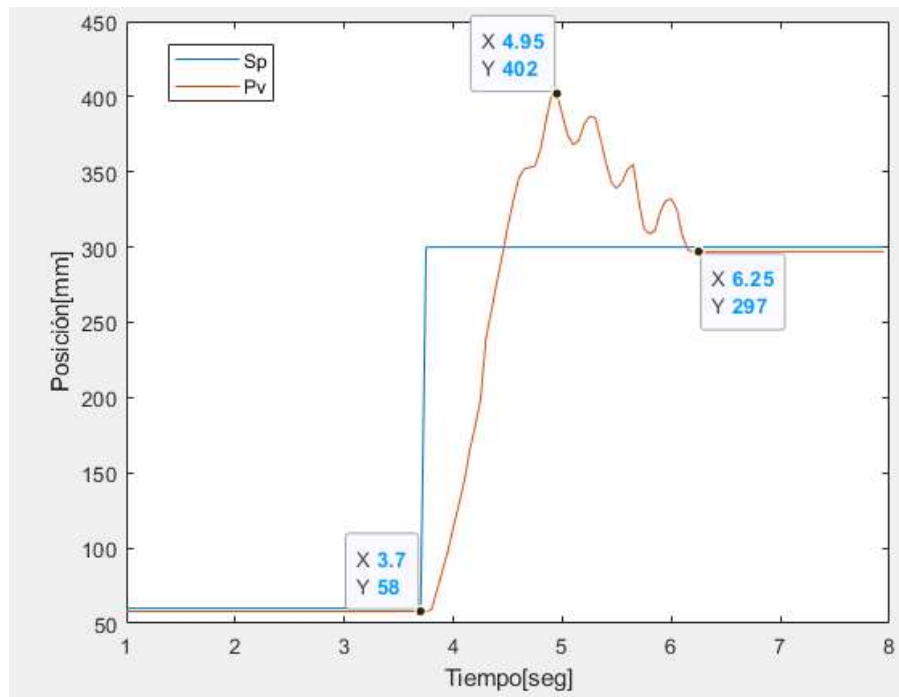
### **Prueba respuesta al escalón**

Para la prueba de escalón se tiene a la corredera en una posición inicial y luego se aplica un escalón con determinado valor al set-point, los valores inicial y final de set-point se eligen de tal forma que la corredera no toque los muelles a ningún momento del experimento, pero que a la vez el sistema tenga el mayor error inicial posible, esto con el fin de analizar de forma efectiva la respuesta del sistema al generar un gran cambio en el valor de set-point.

El resultado de la prueba de respuesta al escalón se muestra en la Figura 68, la corredera tiene una posición inicial de 58 mm y se aplica un escalón de valor 300mm.

**Figura 68**

*Prueba escalón al sistema controlado.*



*Nota.* Se muestra de color azul el valor de referencia “Sp” y de color naranja la posición de la corredera “Pv”, se detallan 3 puntos importantes: punto de conmutación de “Sp”, pico máximo, punto de establecimiento.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\text{Tiempo de establecimiento} = 2.55 \text{ s}$$

$$\text{Sobrepaso} = 42.5 \%$$

Se presentan unas pequeñas oscilaciones en el intervalo de bajada de la respuesta.

Los resultados son congruentes con las especificaciones de diseño, el sistema presenta un tiempo de establecimiento corto a expensas de presentar un sobrepaso elevado. Las oscilaciones se deben a la interacción entre el tiempo integral y el derivativo.

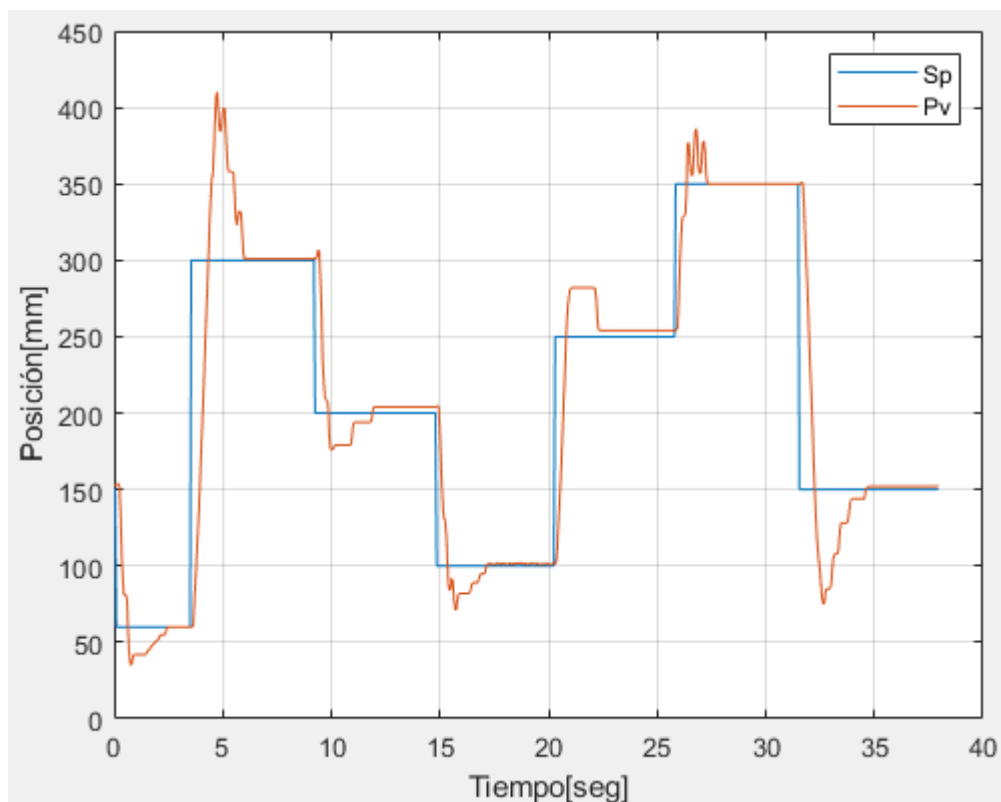
### Prueba seguimiento a la referencia

Para la prueba de seguimiento a la referencia se tiene a la corredera en una posición inicial y luego se modifica el set-point a diferentes valores con el fin de evaluar la capacidad del sistema de seguir un valor de set-point que sufre varios cambios en pequeños intervalos de tiempo.

El resultado de la prueba de seguimiento a la referencia se muestra en la Figura 69.

#### Figura 69

*Prueba seguimiento al sistema controlado.*



*Nota.* Se muestra de color azul el valor de referencia “Sp” y de color naranja la posición de la corredera “Pv”.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tiempo de establecimiento promedio = 2.41 s

Sobrepaso promedio = 31.36 %

El sistema muestra un buen seguimiento a la referencia siendo destacable el bajo tiempo de establecimiento, los sobrepasos son elevados debido a la velocidad de respuesta del controlador. Para todos los valores de set-point el controlador logra alcanzar el valor de referencia con un tiempo y sobrepaso congruentes con su comportamiento agresivo deseado.

El valor de sobrepaso y de tiempo de establecimiento son menores en comparación con los obtenidos en la prueba al escalón lo cual se debe a que en esta prueba la variación en el set-point (aunque elevada) es menor a la empleada en esa prueba.

### **Prueba de robustez**

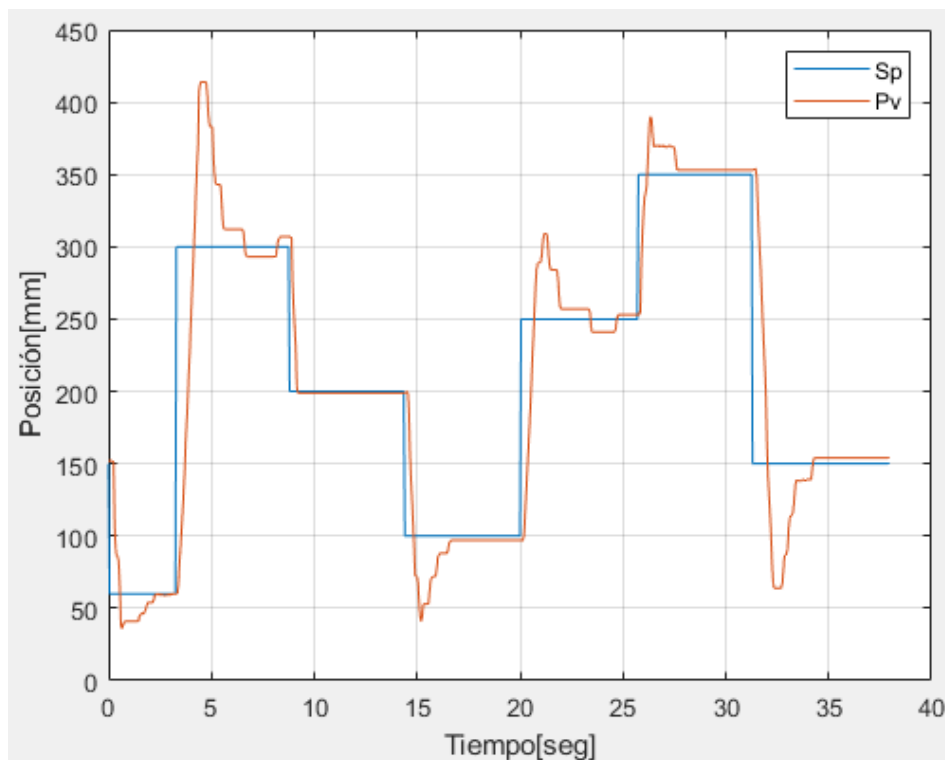
La prueba de robustez consiste en poner en funcionamiento al sistema con una presión de aire reducida (4 bar) y repetir el mismo experimento de la prueba de seguimiento, esto se realiza con el fin de evaluar la capacidad del sistema a operar en condiciones adversas.

El resultado de la prueba de robustez se muestra en la Figura 70.



**Figura 70**

*Prueba robustez al sistema controlado.*



*Nota.* Se muestra de color azul el valor de referencia “Sp” y de color naranja la posición de la corredera “Pv”.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tiempo de establecimiento promedio = 2.66 s

Sobrepaso promedio = 42.4 %

El sistema logra establecerse a todos los valores de referencia por lo que presenta un buen seguimiento aún con una presión reducida, sin embargo, el tiempo de establecimiento promedio aumentó un 10.37% y el sobrepaso promedio aumentó un 11.04%. Este comportamiento tiene sentido ya se espera que el sistema pierda sus capacidades conforme se reduzca el valor de presión con el cual es alimentado.

De forma resumida, el sistema tiene una respuesta satisfactoria a pérdidas de presión de alimentación manteniendo su efectividad en el seguimiento al valor de set-point y una respuesta con capacidades reducidas.

### **Prueba de seguimiento con carga**

Para la prueba de seguimiento con carga se realiza el mismo procedimiento que la prueba de seguimiento con la diferencia que a la corredera del actuador lineal le es acoplada un peso conocido con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema al realizar un trabajo con una carga de 2.5kg. El sistema con la carga acoplada se muestra en la Figura 71.

### **Figura 71**

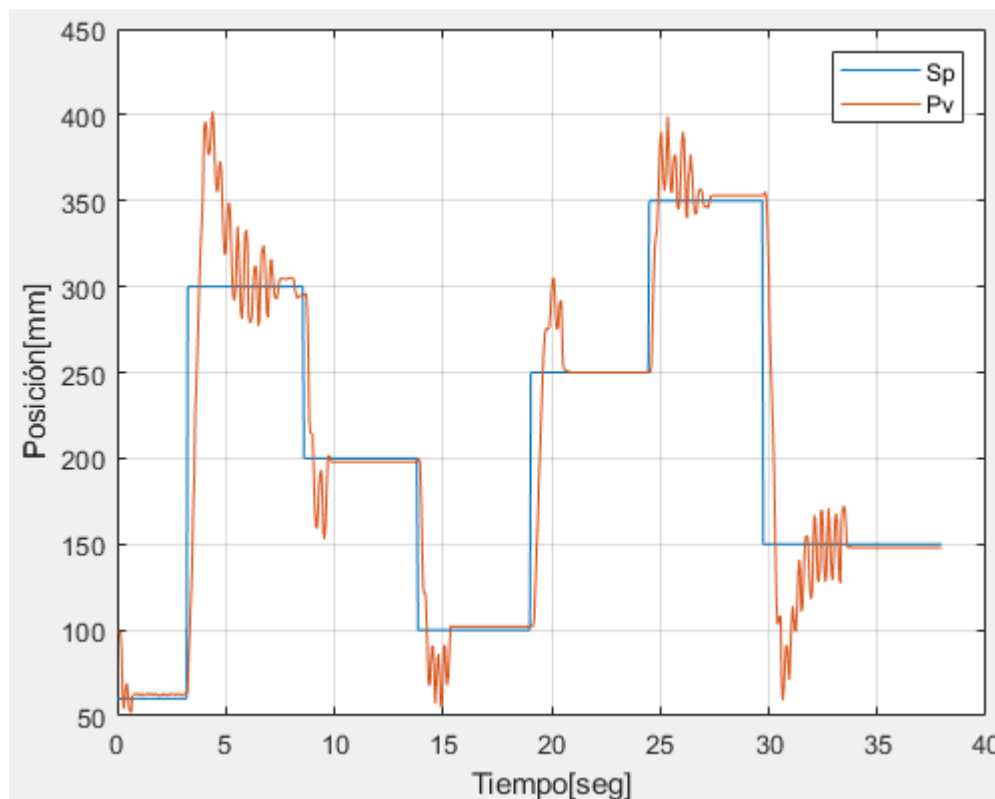
*Sistema con carga (2.5kg) acoplada.*



El resultado de la prueba de seguimiento a la referencia se muestra en la Figura 72.

**Figura 72**

*Prueba de seguimiento con carga al sistema controlado.*



*Nota.* Se muestra de color azul el valor de referencia “Sp” y de color naranja la posición de la corredera “Pv”.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\text{Tiempo de establecimiento promedio} = 2.62 \text{ s}$$

$$\text{Sobrepaso promedio} = 44.16 \%$$

El sistema logra establecerse a todos los valores de referencia por lo que presenta un buen seguimiento aún con la carga, sin embargo, el tiempo de establecimiento promedio aumentó un 8.30% y el sobrepaso promedio aumentó un 12.8%. Este comportamiento es el esperado ya que la inclusión de una carga es el equivalente a un cambio de condiciones de funcionamiento para el sistema, hay que notar que las oscilaciones para esta prueba aumentaron en gran medida, esto es debido a que la carga aumenta la inercia del pistón lo que

provoca que el controlador, al tener una masa mayor que controlar, envíe señales de corrección de mayor magnitud al sistema provocando las oscilaciones mencionadas.

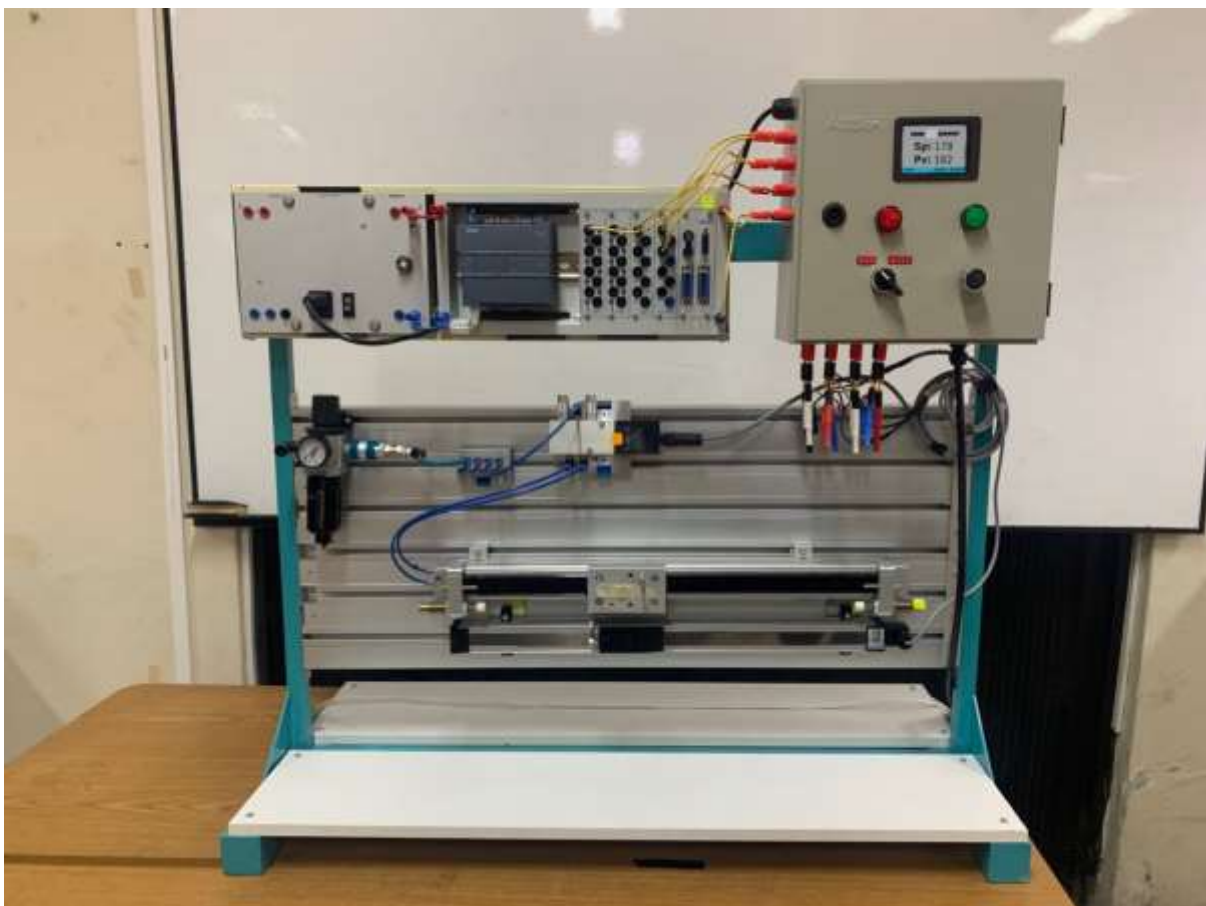
De forma resumida, el sistema tiene una respuesta satisfactoria en cuanto a seguimiento, tiempo de establecimiento y sobrepaso. Sin embargo, presenta oscilaciones que en determinadas aplicaciones no serían admisibles.

### **Producto final**

El sistema completo colocado en el laboratorio de Neumática e Hidráulica se muestra en la Figura 73.

### **Figura 73**

*Producto Final.*



El sistema está ubicado sobre una mesa y se localiza frente a un pizarrón en el laboratorio de Neumática e Hidráulica, su conexión al sistema de aire se realiza mediante una manguera de abastecimiento propia del sistema y la energía eléctrica se toma de un cable con enchufe proveniente del tablero de control el cual se enchufa a un conector colocado al pie de la mesa, por lo que el sistema puede ser trasladado a cualquier parte del laboratorio de ser necesario.

### Evaluación HMI

Se realiza una evaluación bajo los criterios enunciados en la guía Gedis, por cada criterio se da una valoración correspondiente al grado de conformidad de la HMI desarrollada con un número del 1 al 5, donde 1 representa un cumplimiento pobre del criterio y 5 representa un cumplimiento satisfactorio.

En la Tabla 8 se muestra la evaluación realizada a la HMI.

**Tabla 8**

*Evaluación de HMI bajo criterios guía Gedis.*

	<b>Criterios</b>	<b>Valoración</b>	<b>Observación</b>
<b>Arquitectura</b>	Correspondencia con la planta	5	Se representan los equipos presentes
	Número de capas	4	No requiere varias capas
	Existencia de mapa	5	Representación completa
<b>Distribución</b>	Consistencia	4	Es consistente
	Densidad	5	Baja densidad
	Simetría y balance	4	Es simétrico y balanceado
	Flujo de proceso	4	Representación simplificada
<b>Navegación</b>	Correspondencia con arquitectura	5	Es correspondiente
	Accesibilidad	5	Fácil acceso
	Consistencia	5	Uso de pantalla táctil

	<b>Criterios</b>	<b>Valoración</b>	<b>Observación</b>
<b>Uso del color</b>	Visibilidad	5	Colores opacos
	Contraste con el fondo	5	Alto contraste
	Número de colores	4	Se usan 5 colores
	Diferenciación entre colores	5	Bastante distintos
	Uso de colores típicos	4	Se emplean colores típicos
	Consistencia	5	Uso determinado
<b>Información textual</b>	Número de fuentes	5	Se emplea una única fuente
	Número de tamaños	4	3 tamaños
	Visibilidad del texto	4	Texto visible
	Espaciamiento	5	Buena separación
	Alineación	5	Texto alineado
	Uso del énfasis	4	Uso de énfasis en variables
	Coloración del texto	5	Apropiada
	Consistencia	5	Es consistente
<b>Símbolos y representación de los equipos</b>	Facilidad de reconocimiento	4	Gráficos reconocibles
	Visibilidad del estado	4	Visibilidad de su respuesta
	Consistencia	5	Solo se muestra un equipo
<b>Valores de proceso</b>	Visibilidad	5	Valores importantes mostrados
	Ubicación	5	Uso de zonas apropiadas
	Distribución	5	Distribución adecuada
	Agrupación de datos	4	Acorde con la función
	Consistencia	5	Es consistente
<b>Tablas y grupos de tendencia</b>	Formato	5	Formato adecuado
	Visibilidad	5	Bastante visible
	Ubicación	4	Ubicación apropiada
	Agrupación	4	Datos agrupados
	Configuración tendencias	1	Sin configuración
	Consistencia	4	Consistente
<b>Comando e ingreso de datos</b>	Visibilidad	4	Suficientemente visibles
	Maniobrabilidad	4	Fácil maniobrabilidad
	Retroalimentación	3	Mejorable
	Consistencia	5	Consistente
<b>Alarmas</b>	Visibilidad de las alarmas	1	No Aplica
	Accesibilidad a las alarmas	1	No Aplica
	Ubicación de las alarmas	1	No Aplica
	Información de alarmas	1	No Aplica
	Visibilidad de alarmas	1	No Aplica
	Facilidad de reconocimiento	1	No Aplica
	Consistencia	1	No Aplica
<b>Valoración Total</b>			3,96

Tras realizar la evaluación se obtiene una calificación promedio de 3.96, lo cual indica que la HMI satisface en buena medida las recomendaciones por la guía Gedis, sin embargo, tiene espacio para mejorar, especialmente en la implementación de un sistema de alarmas para el proceso.

## Capítulo V

### Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

#### Conclusiones

Se diseñó y construyó una estación en el laboratorio de Neumática e Hidráulica de la Universidad de las Fuerzas Armadas, esta estación comprende un sistema de control de posición de un actuador lineal neumático mediante un controlador lógico programable (PLC) y la implementación de una rutina PID, esta estación no solo permite un control preciso, sino que también facilita la modificación de parámetros según las necesidades del operador. La inclusión del tablero eléctrico, la interfaz humano-máquina y la capacidad de modificar valores de consigna y parámetros del controlador, confieren versatilidad y practicidad a esta herramienta de uso didáctico con potencial aplicabilidad industrial.

El punto de partida fue la identificación de la planta la cual se definió como el conjunto válvula proporcional direccional, actuador neumático lineal y potenciómetro lineal, esta planta fue excitada con una señal binaria pseudo-randómica (PRBS) y medida su respuesta, los datos obtenidos fueron introducidos al software de simulación numérica y, empleando la herramienta de identificación de sistemas, se obtuvo un modelo de la planta con un cero y dos polos que al validarlo arroja un ajuste con los valores reales de 86.08%.

Previo a la identificación de la planta se realizó una reducción de banda muerta del sistema la cual se presenta debido a la zona muerta de la válvula proporcional y la inercia del pistón del actuador lineal, el proceso consistió en excluir un rango de valores de entrada a la planta, con el fin de mejorar el funcionamiento del sistema controlado cuando se tienen errores pequeños y aumentar el ajuste de los modelos obtenidos en la identificación. Dicho proceso demostró ser eficaz ya que aumentó los valores de ajuste iniciales de alrededor de 70% al valor de 86.8% obtenido en el modelo empleado para la sintonización.



En la sintonización del controlador PID se empleó el método de ubicación de polos en tiempo discreto tomando como criterio de desempeño obtener una respuesta rápida, el resultado es un sistema controlado con un seguimiento a la referencia satisfactorio, robusto a perturbaciones y comportamiento con carga aceptable. El comportamiento del sistema con una variación máxima en el valor de set-point causa una respuesta con un tiempo de establecimiento de 2.55 segundos y sobrepaso de 42.5% (valores máximos) lo cual verifica el comportamiento agresivo deseado del controlador.

Se realizó además una valoración a la interfaz humano-máquina (HMI) en base a los criterios de la guía Gedis, en la cual se obtuvo un puntaje de 3.96 sobre 5 puntos, lo cual demuestra que, si bien la interfaz cumple con los requisitos funcionales, esta tiene espacio para mejorar, en especial en los ámbitos de configuración de gráficas y alarmas de proceso.

En conclusión, la creación y puesta en marcha de la estación de trabajo representa un paso significativo en la habilidad de la Universidad para integrar conceptos de neumática y control en un entorno educativo. Al ofrecer a estudiantes e investigadores una plataforma donde puedan interactuar y experimentar con estas tecnologías, la universidad fomenta un aprendizaje enriquecedor y potencia posibles avances en estas disciplinas. En síntesis, la estación de trabajo realizada se convierte en un activo valioso para la formación, la investigación y la innovación en el ámbito de la ingeniería.

## 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**

Se tienen 2 propuestas para 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.

## Bibliografía

- Instrument Society of America. (1966). *ISA-S26-1968: Dynamic Response Testing of Process control instrumentation*. Instrument Society of America.
- Astrom, K., & Wittenmark, B. (1997). *Computer-Controller Systems 3ra Ed.* Prentice Hall.
- Bejarano, P. (17 de Marzo de 2022). *Nivel de Automatización en las Organizaciones*. LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/ecuador-nivel-de-automatizaci%C3%B3n-en-las-organizaciones#:~:text=Para%20el%20a%C3%B1o%202022%2C%20las,a%C3%BAn%20con%20alto%20componente%20manual>.
- Caiza, L. (2015). *Sistemas de Control de Lazo Abierto y Cerrado de Voltaje para Determinar el Error en Estado Estable a Diferentes Pulsos de Entrada en el Laboratorio de Control y Automatización de la FICM*. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/13426>
- Charles, L., & Nagle, H. (1984). *Sistemas de Control Digital Análisis y Diseño*. Prentice Hall.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial 8va Ed.* Marcombo.
- Doebelin, E. (1993). *Measurement Systems, Application and Design 4ta Ed.* McGraw-Hill.
- Festo AG & Co . (01 de Agosto de 2023). *Unidades de mantenimiento combinadas MSB4*. Festo Web Site: [https://www.festo.com/co/es/p/unidades-de-mantenimiento-combinadas-id\\_MSB4/?page=0](https://www.festo.com/co/es/p/unidades-de-mantenimiento-combinadas-id_MSB4/?page=0)
- Festo AG & Co. (Octubre de 2003). *DGP/DGPL rodless drive units*. Festo Web site: [https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id\\_pim216/](https://www.festo.com/gb/en/c/products/industrial-automation/actuators/pneumatic-cylinders/rodless-cylinders-id_pim216/)
- Festo AG & Co. (Marzo de 2016). *Displacement Encoders*. Festo Web Site: <https://www.festo.com/us/en/a/152628/>
- Festo AG & Co. (Agosto de 2021). *Proportional Directional Valves*. Festo Web Site: [https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id\\_MPYE\\_1/?page=0](https://www.festo.com/us/en/p/proportional-directional-control-valve-id_MPYE_1/?page=0)

Festo AG & Co. (2023). *Position Sensors*. Festo Web Site:

<https://www.festo.com/us/en/a/152628/>

Gausemeler, J., & Moehringer, S. (2002). VDI 2206 - A new Guideline for the Design of Mechatronic Systems. *IFAC Publications*, 35(2), 785-790.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34035-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34035-1)

Gerhartz, D. S. (2002). *Neumática en Bucle Cerrado*. Festo Didactic.

Giraldo, D. T. (1997). *Teoría de Control*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Gutiérrez, S. I. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Hernández, R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Control*. Pearson.

International Electrotechnical Commission. (2003). *IEC 61131-1: Programmable Controllers*. IEC International Standard.

International Organization for Standardization. (2012). *ISO 1219-1: Graphic symbols for pneumatic equipment*. International Organization for Standardization.

International Society of Automation. (2015). *ANSI/ISA-101.01: Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. International Society of Automation.

Kara, T., & Eker, I. (2004). Nonlinear Closed-Loop Direct Identification of a DC Motor with Load for Low Speed Two-Direction Operation. *Electrical Engineering*, 1(86), 87–96.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00202-003-0189-z>

Landau, G., & Zito, D. (2006). *Digital control Systems*. Springer.

Manzucco, G. (21 de Octubre de 2020). *¿Qué es una Unidad de Mantenimiento o FRL?*

Compara Software Web site: <https://blog.comparasoftware.com/unidad-de-mantenimiento/#Funcionamiento-de-una-Unidad-de-Mantenimiento-Neumatica-o-FRL>

Norman, S. (2004). *Sistemas de Control para Ingeniería*. Continental.

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna 3ra Ed*. Prentice Hall.

- Orellana, A., & Cascante, J. (2017). Modelado y Control de Posición de un Cilindro de Doble Efecto Utilizando PID y PID-Difuso con Matlab. [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14554>
- Parr, A. (1998). *Hydraulics and Pneumatics*. Elsevier Ltd.
- Ponsa, P., Vilanova, R., Diaz, M., & Gomá, A. (2007). Interface Design Improvement in Supervisory. *E-Minds: International Journal on Human-Computer Interaction*, 1(3), p. 21-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.5772/5840>
- Raspberry Pi. (2018). *Raspberyy Pi 3 Model B+*. Raspberry Pi Web Site: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Siemens AG. (3 de Octubre de 2023). *Data sheet 6ES7214-1AG40-0XB0*. Siemens Industry Mall: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7214-1AG40-0XB0>
- Siemens AG. (08 de Febrero de 2023). *Data sheet 6ES7232-4HA30-0XB0*. Siemens Web Site: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/es/Catalog/Product/6ES7232-4HA30-0XB0>
- UCTRONICS. (s.f.). *UCTRONICS 3.5 Inch Touch Screen*. UCTRONICS Store: <https://www.uctronics.com/uctronics-3-5-inch-hdmi-tft-lcd-display-with-touch-screen-touch-pen-3-heat-sinks-for-raspberry-pi-3-model-b-pi-2-model-b-pi-b.html>