

**Universidad Católica de Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,**

**Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE  
POSICIONAMIENTO LINEAL PARA UN CILINDRO HIDRÁULICO CON  
TARJETAS PID”**

Tesis presentada por el bachiller:

**Agramonte Araca, Jorge Alonso**

Para optar el Título Profesional de:

**Ingeniero Mecatrónico**

Asesor: **Ing. Quispe Ccachuco, Marcelo**

**AREQUIPA – PERÚ**

**2019**



*Universidad Católica de Santa María*

☎ (51 54) 382038 Fax:(51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado:1350

AREQUIPA - PERÚ

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA  
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA**

**INFORME DICTAMINATORIO**

**VISTO**

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE  
CONTROL DE POSICIONAMIENTO LINEAL PARA  
UN CILINDRO HIDRAULICO CON TARJETAS PID”**

Presentado por el Bachiller:

AGRAMONTE ARACA JORGE ALONSO

Nuestro **DICTAMEN** es:

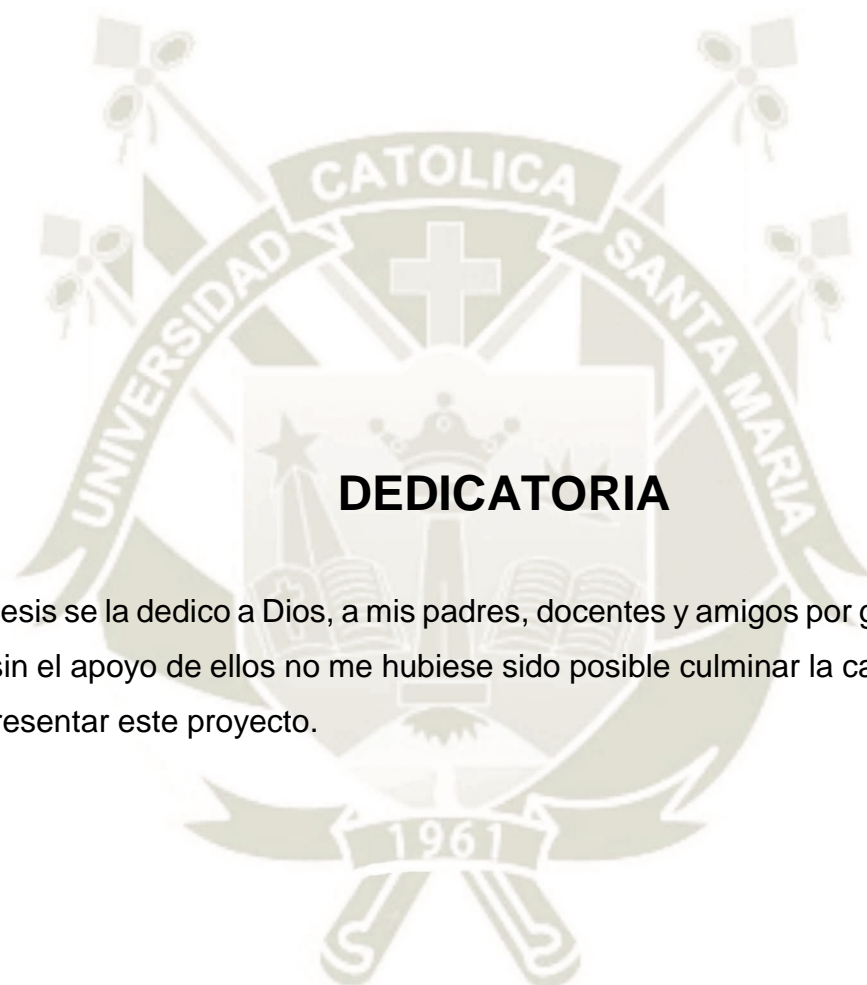
Favorable

OBSERVACIONES: NINGUNA

Arequipa, 28 DICIEMBRE 2018

  
\_\_\_\_\_  
ING. MARCELO QUISPE CCACHUCO

  
\_\_\_\_\_  
ING. SERGIO MESTAS RAMOS



## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a Dios, a mis padres, docentes y amigos por guiar mis pasos, ya que sin el apoyo de ellos no me hubiese sido posible culminar la carrera y a la vez poder presentar este proyecto.

***Jorge***

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la fortaleza necesaria para poder cumplir mis proyectos, por haberme dado la oportunidad de tener personas tan maravillosas en la vida.

Agradezco a mis padres Jorge y Jeanette a mi hermano Renzo por brindarme su apoyo incondicional, por su esfuerzo para poder tener educación superior de calidad, por su confianza en mí y sobre todo por los consejos que me han dado a lo largo de la vida.

Agradezco a mi Universidad y a mis a todos mis docentes en especial a los ingenieros Marcelo Quispe, Sergio Mestas, Fernando Siles, Christiam Collado, Juan Diego Cáceres, Hermann Alcázar, a los técnicos Vidal y Frank, que me dieron los conocimientos, recomendaciones y ánimos necesarios para poder realizar el presente proyecto de tesis.

**Jorge**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
CAPITULO I.....	1
1. Marco Metodológico .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo Principal .....	1
1.2.1. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Justificación .....	2
1.3.1. Justificación Técnica.....	2
1.3.2. Justificación Académica.....	2
1.4. Descripción del problema .....	3
1.5. Antecedentes.....	4
1.5.1. Antecedentes Locales.....	4
1.5.2. Antecedentes Nacionales .....	4

1.5.3. Antecedentes Internacionales .....	5
1.6. Alcances y Limitaciones.....	5
1.7. Ubicación Espacial y Temporal.....	6
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>7</b>
2. Marco Teórico.....	7
2.1. Introducción .....	7
2.2. Hidráulica.....	10
2.2.1. Clasificación la Hidráulica.....	10
2.2.1.1. Clasificación según campos aplicativos: .....	10
2.2.1.2. Clasificación según el tipo accionamientos .....	11
2.2.1.3. Clasificación según su tipo de control .....	11
2.2.2. Componentes del sistema hidráulico.....	12
2.2.2.1. Unidad hidráulica.....	15
2.2.2.2. Válvula limitadora de presión.....	17
2.2.2.3. Válvulas direccionales .....	18
2.2.2.4. Válvulas reguladoras de caudal.....	18
2.3. Hidráulica Proporcional.....	19
2.3.1. Válvulas continuas.....	22
2.3.1.1. Válvulas direccionales no pilotadas sin realimentación .....	26
2.3.2. Amplificador electrónico .....	27
2.3.3. Solenoides Proporcionales.....	29

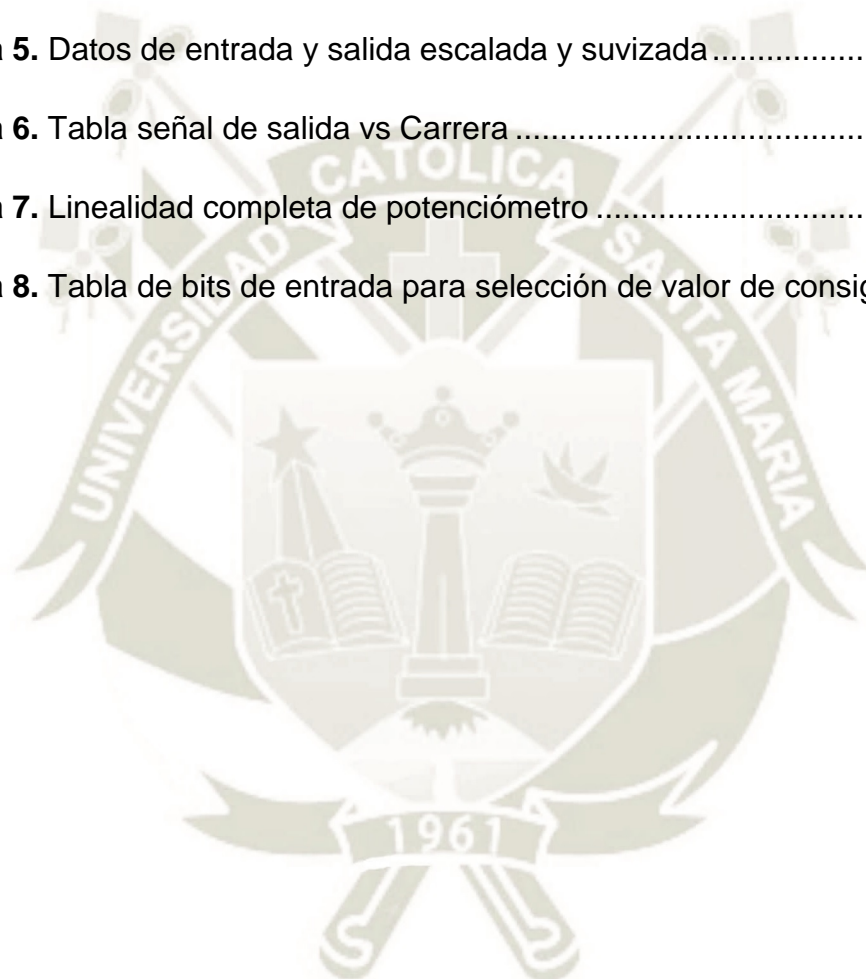
2.3.4. Actuador .....	30
2.3.5. Sensores .....	32
2.4. Sistema de control .....	34
2.4.1. Conceptos preliminares importantes .....	34
2.4.1.1. Error .....	34
2.4.1.2. Exactitud.....	34
2.4.1.3. Precisión.....	34
2.4.1.4. Velocidad de respuesta .....	34
2.4.1.5. Zona Muerta .....	35
2.4.1.6. Histéresis.....	35
2.4.1.7. Ruido .....	35
2.4.1.8. Linealidad .....	35
2.4.1.9. Máximo sobreimpulso.....	35
2.4.2. Sistemas no-lineales .....	36
2.4.3. Modelamiento de sistemas.....	38
2.4.4. Modelos Hammerstein-Wiener .....	40
2.4.5. Controladores PID .....	43
2.4.6. Método clásico de sintonización de controladores PID .....	46
2.5. Programas a emplear .....	47
2.5.1 MATLAB .....	47
2.5.2 FluidSim H.....	48

<b>CAPITULO III.....</b>	<b>49</b>
3. Diseño e implementación.....	49
3.1. Modelamiento del Sistema y Adquisición de Datos .....	49
3.1.1. Generación y Adquisición .....	49
3.1.2. Señales de entrada y salida .....	51
3.1.3. Almacenamiento de datos .....	52
3.1.4. Modelamiento .....	53
3.1.5. Zona Muerta .....	53
3.1.6. Sistema sin carga .....	57
3.1.7. Sistema con carga.....	71
3.2. Componentes a emplear .....	83
3.3. Diseño de los Circuitos.....	101
3.4. Implementación .....	105
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>109</b>
<b>4. Pruebas y Resultados .....</b>	<b>109</b>
4.1. Simulaciones .....	109
4.2. Pruebas del sistema sin controlador .....	110
4.3. Pruebas con controlador.....	111
4.3.1. Sistema sin carga.....	112
4.3.2. Sistema con carga .....	113
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>120</b>

<b>OBSERVACIONES.....</b>	<b>121</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO 01: REGULADOR PID.....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO 02: AMPLIFICADOR DE 2 CANALES .....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO 03: TARJETA DE VALOR DE CONSIGNA.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXO 04: VÁLVULA PROPORCIONAL DE 4/3 VIAS.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO 05: CILINDRO HIDRÁULICO .....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXO 06: POTENCIÓMETRO LINEAL.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO 07: SLIDER.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO 08: GUIAS DE PRÁCTICAS.....</b>	<b>147</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Parámetros de ajuste PID.....	46
<b>Tabla 2.</b> Muestra de datos de la rampa de voltaje vs desplazamiento de pistón .	54
<b>Tabla 3.</b> Rampa de voltaje vs pistón extendido .....	55
<b>Tabla 4.</b> Data adquirida por el osciloscopio mostrada en una hoja de cálculo ....	58
<b>Tabla 5.</b> Datos de entrada y salida escalada y suavizada.....	73
<b>Tabla 6.</b> Tabla señal de salida vs Carrera .....	85
<b>Tabla 7.</b> Linealidad completa de potenciómetro .....	86
<b>Tabla 8.</b> Tabla de bits de entrada para selección de valor de consigna .....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Cilindro Hidráulico de doble Efecto .....	3
<b>Figura 1.2.</b> Diagrama de Bloques de un Controlador PID .....	4
<b>Figura 2.1.</b> Ilustración de los fuelles de un alto horno operados por medio de ruedas hidráulicas .....	7
<b>Figura 2.2.</b> Prensa hidráulica .....	8
<b>Figura 2.3.</b> Clasificación de la hidráulica según sus campos aplicativos .....	11
<b>Figura 2.4.</b> Lazo abierto vs Lazo cerrado.....	12
<b>Figura 2.5.</b> Descripción de componentes de un circuito Oleohidráulico.....	13
<b>Figura 2.6.</b> Descripción de componentes de un circuito Oleohidráulico.....	14
<b>Figura 2.7.</b> Depósito Hidráulico.....	15
<b>Figura 2.8.</b> Unidad de potencia hidráulica .....	16
<b>Figura 2.9.</b> Válvula limitadora de presión .....	17
<b>Figura 2.10.</b> Secuencia con rampas para un elevador hidráulico.....	20
<b>Figura 2.11.</b> Esquema de elevador hidráulico.....	20
<b>Figura 2.12.</b> Comparativa Ventajas-desventajas de la hidráulica proporcional frente a los Accionamientos eléctricos .....	21
<b>Figura 2.13.</b> Simbología válvula continua de 4/3.....	22
<b>Figura 2.14.</b> Tipos de válvulas continuas.....	23
<b>Figura 2.15.</b> Comparativa Servoválvulas vs Válvulas proporcionales .....	23
<b>Figura 2.16.</b> Clasificación de acuerdo al control, mando y desempeño .....	24
<b>Figura 2.17.</b> Válvulas proporcionales y funciones realizables con las mismas ...	25
<b>Figura 2.18.</b> Corte transversal válvula 4/3.....	26
<b>Figura 2.19.</b> Diagrama de bloques Amplificador electrónico .....	28

<b>Figura 2.20.</b> Curva característica Caudal-Señal.....	29
<b>Figura 2.21.</b> a) Cilindro de doble efecto: símbolo y corte b) Leyenda .....	30
<b>Figura 2.22.</b> Cilindro telescópico .....	32
<b>Figura 2.23.</b> Representación eléctrica de un potenciómetro lineal .....	33
<b>Figura 2.24.</b> Potenciómetro lineal Modelo KPM12 .....	33
<b>Figura 2.25.</b> Diagrama de bloques H-W .....	41
<b>Figura 2.26.</b> Diagrama de bloques .....	43
<b>Figura 2.27.</b> Oscilación del sistema con el Kc.....	47
<b>Figura 2.24.</b> MATLAB.....	48
<b>Figura 2.25.</b> FluidSIM H .....	48
<b>Figura 3.1.</b> Osciloscopio Tektronix .....	49
<b>Figura 3.2.</b> Sistema en lazo abierto como estrategia. ....	50
<b>Figura 3.3.</b> Esquema de generación y adquisición de data.....	50
<b>Figura 3.4.</b> Rampa ascendente vs desplazamiento del pistón .....	55
<b>Figura 3.5.</b> Rampa negativa vs retraimiento del pistón .....	56
<b>Figura 3.6.</b> Armado de componentes en el módulo didáctico.....	57
<b>Figura 3.7.</b> Señal seudo binaria aleatoria (CH1) y salida del sistema (CH2).....	58
<b>Figura 3.8.</b> Vectores “u1” y “y1” .....	59
<b>Figura 3.9.</b> Datos importados al workspace de Matlab.....	59
<b>Figura 3.10.</b> Ventana principal System Identification Tool.....	60
<b>Figura 3.11.</b> Importación de datos con System Identification Tool .....	60
<b>Figura 3.12.</b> Ploteado de señales de entrada y salida .....	61
<b>Figura 3.13.</b> Opciones de estimación de modelos .....	62
<b>Figura 3.14.</b> Opciones de estimación de modelos .....	62

<b>Figura 3.15.</b> Best Fits de modelos estimados .....	63
<b>Figura 3.16.</b> Configuración de parámetros modelo Hammerstein-Wiener.....	63
<b>Figura 3.17.</b> Escogemos mejores aproximaciones.....	64
<b>Figura 3.18.</b> Respuesta del sistema con la función LTI Viewer.....	64
<b>Figura 3.19.</b> Variables en el workspace .....	65
<b>Figura 3.20.</b> Señales u1 y y1 .....	65
<b>Figura 3.21.</b> Obtención de la función de transferencia a partir del modelo no-lineal .....	66
<b>Figura 3.22.</b> Escalón unitario aplicado a la planta modelada “G” en lazo abierto	66
<b>Figura 3.23.</b> Best Fits de un modelado anterior .....	67
<b>Figura 3.24.</b> Función de transferencia de un modelado anterior .....	67
<b>Figura 3.25.</b> Respuesta inestable de la planta “G” .....	68
<b>Figura 3.26.</b> Respuesta del sistema en lazo cerrado .....	68
<b>Figura 3.27.</b> Oscilaciones del sistema al aplicar el Kc.....	69
<b>Figura 3.28.</b> Respuesta con controlador PI.....	70
<b>Figura 3.29.</b> Respuesta con controlador PID .....	70
<b>Figura 3.30.</b> Respuesta de la planta “G” ya con controlador PI.....	70
<b>Figura 3.31.</b> Reemplazo del extremo final del vástago.....	71
<b>Figura 3.32.</b> Cilindro acoplado con la masa de aluminio.....	72
<b>Figura 3.33.</b> Respuesta del sistema a lazo abierto .....	72
<b>Figura 3.34.</b> Datos del sistema sin tratamiento .....	74
<b>Figura 3.35.</b> Datos del sistema suavizados.....	74
<b>Figura 3.36.</b> Estimaciones hechas sobre “mydata” .....	75
<b>Figura 3.37.</b> Datos de entrada u1 y salida u2 muestreados .....	75

<b>Figura 3.38.</b> Parámetros del Modelo Hammerstein-Wiener. ....	76
<b>Figura 3.39.</b> Best fits o mejores aproximaciones al modelo .....	76
<b>Figura 3.40.</b> Respuesta del sistema a lazo abierto .....	77
<b>Figura 3.41.</b> Linealización y obtención de la función de transferencia. ....	77
<b>Figura 3.42.</b> Lugar de raíces del sistema .....	79
<b>Figura 3.43.</b> Ventana principal de la herramienta “Sisotool” .....	80
<b>Figura 3.44.</b> Ventana Compensator Editor. ....	81
<b>Figura 3.45.</b> Lugar de Raíces modificado. ....	81
<b>Figura 3.46.</b> Respuesta del sistema aplicando el controlador PI. ....	82
<b>Figura 3.47.</b> Potenciómetro lineal KTC-1 modelo 200 mm. ....	83
<b>Figura 3.48.</b> Convertidor DC-DC. ....	84
<b>Figura 3.49.</b> Zona muerta .....	85
<b>Figura 3.50.</b> Salida real vs. Salida ideal del transductor de desplazamiento. ....	87
<b>Figura 3.51.</b> Regulador PID. ....	88
<b>Figura 3.52.</b> Perillas de regulador PID .....	89
<b>Figura 3.53.</b> Amplificador Proporcional .....	90
<b>Figura 3.54.</b> Tarjeta de punto de consigna. ....	91
<b>Figura 3.55.</b> Tipos de rampas en la Tarjeta. ....	92
<b>Figura 3.56.</b> Fuente de Voltaje .....	93
<b>Figura 3.57.</b> Tarjeta Selectora de señales. ....	94
<b>Figura 3.58.</b> Slider modelo KFM 200 mm. ....	95
<b>Figura 3.59.</b> Cilindro de doble efecto: corte. ....	96
<b>Figura 3.60.</b> Válvula proporcional hidráulica de 4 vías y 3 posiciones .....	98
<b>Figura 3.61.</b> Corte transversal válvula 4/3. ....	99

<b>Figura 3.62.</b> Electroválvula 4/2 vías .....	99
<b>Figura 3.63.</b> Filtro hidráulico.....	100
<b>Figura 3.64.</b> Configuraciones en el simulador.....	101
<b>Figura 3.65.</b> Circuito Hidráulico cilindro sin carga .....	102
<b>Figura 3.66.</b> Circuito Hidráulico cilindro con carga de 90 N.....	103
<b>Figura 3.67.</b> Circuito Eléctrico, con tarjeta Punto consigna .....	104
<b>Figura 3.68.</b> Circuito eléctrico con Slider.....	105
<b>Figura 3.69.</b> Maquinado de planchas de acople.....	106
<b>Figura 3.70.</b> Planchas de aluminio para fijar potenciómetro al cuerpo del cilindro .....	106
<b>Figura 3.71.</b> Montaje de plachuela para la unión de ambos vástagos .....	107
<b>Figura 3.72.</b> Montaje de plachuela para la unión de ambos vástagos .....	107
<b>Figura 3.73.</b> Montaje Slider en el perfil.....	108
<b>Figura 3.74.</b> Montaje final de los componentes.....	108
<b>Figura 4.3.</b> Simulación sistema sin peso.....	109
<b>Figura 4.4.</b> Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP.....	110
<b>Figura 4.1.</b> Sistema a lazo cerrado para un SP de 5 VDC.....	110
<b>Figura 4.2.</b> Sistema a lazo cerrado para un SP de 10 VDC.....	111
<b>Figura 4.5.</b> Sistema implementado sin carga.....	112
<b>Figura 4.6.</b> Resuestas a diferentes escalones.....	112
<b>Figura 4.7.</b> Montaje del sistema con el cilindro en posición vertical .....	113
<b>Figura 4.8.</b> Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP.....	114

<b>Figura 4.9.</b> Ajuste de los parámetros.....	114
<b>Figura 4.10.</b> Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP .....	115
<b>Figura 4.11.</b> Respuesta del sistema al aplicarle el controlador P .....	116
<b>Figura 4.12.</b> Respuesta del sistema al aplicarle el controlador PI .....	116
<b>Figura 4.13.</b> Respuesta del sistema al aplicarle el controlador PID .....	117
<b>Figura 4.14.</b> Respuesta del sistema a escalón de 5 volt .....	117
<b>Figura 4.15.</b> Respuesta del sistema a rampas de 1 volt/seg .....	118
<b>Figura 4.16.</b> Respuesta del sistema a rampas de 1 volt/seg .....	118
<b>Figura 4.17.</b> Respuesta del sistema a distintos escalones.....	119
<b>Figura 4.18.</b> Respuesta del sistema a set points aleatorios hechos con el Slider .....	119

## RESUMEN

La presente investigación está comprendida dentro de la rama de la hidráulica llamada hidráulica proporcional; el sistema a controlar el comprendido por un cilindro hidráulico, válvula proporcional y unidad motriz de la marca Festo; esto a través de la identificación de la planta y el modelamiento de misma a través del modelo Hammerstein-Wiener a través de la herramienta "System Identification Tool" del software Matlab; para esta investigación, y ya que el sistema es no-lineal, la mayor no linealidad la tomaremos como la zona muerta positiva y negativa que presentan las válvulas proporcionales; este modelado mediante herramientas computacionales, para la posterior sintonización de una tarjeta Regulador PID de Festo; que cumpla con el requerimiento de controlar la posición y que se comporte como un sistema seguidor de trayectorias; para poder hacer la realimentación del sistema, e acopló un potenciómetro lineal que será usado como transductor de posición para lograr saber en todo momento la posición del embolo del cilindro.

**Palabras Clave:** Actuador Lineal, Cilindro Hidráulico, Hidráulica Proporcional, PID, modelado de sistemas, Control.

## ABSTRACT

The present investigation is comprised within the branch of hydraulics called proportional hydraulics; the system to be controlled by a hydraulic cylinder, proportional valve and motor unit of the Festo brand; this through the identification of the plant and its modeling through the Hammerstein-Wiener model through the "System Identification Tool" of Matlab software; for this investigation, and since the system is non-linear, the greater non-linearity will be taken as the positive and negative dead zone presented by the proportional valves; this modeling by means of computational tools, for the later tuning of a card PID Regulator of Festo, that fulfills the requirement to control the position and that behaves like a follower system of trajectories; to be able to do the feedback of the system, it coupled a linear potentiometer that will be used as a position transducer to achieve to know at all times the position of the plunger of the cylinder.

**Keywords:** Linear actuator, Hydraulic Cylinder, proportional hydraulics, PID, systems modeling, control.

# CAPITULO I

## 1. Marco Metodológico

### 1.1. Introducción

La hidráulica es una rama de la ciencia que de manera progresiva ha ido tomando mayor relevancia tanto en el campo académico como en el sector industrial, esto ha generado el mayor interés y desarrollo en esta área del conocimiento.

El empleo de nuevas tecnologías en los campos científicos e industriales, da lugar a investigaciones que la industria ligada al uso de sistemas hidráulicos genera, es en este tópico que los procesos hidráulicos requieren ser automatizados, ello con el fin de alcanzar el control y monitoreo de los mismos y buscando la implementación de sistemas de alta precisión y flexibilidad, que permitan controlar variables físicas como posición, velocidad, fuerza, entre otros; en consecuencia a esto se hace pertinente el desarrollo de una aplicación para determinar la posición exacta del extremo final del vástago en procesos donde se requiere registrar con precisión de repetición la posición del embolo como por ejemplo: prensado, atornillado, soldadura o selección de piezas.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo Principal

Diseñar e implementar el sistema de Control de posición lineal para un cilindro hidráulico con Tarjetas PID.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Diseñar los parámetros del sistema de control que se usarán para el correcto funcionamiento del sistema.
- Implementar y poner en funcionamiento el circuito electrohidráulico de control de posición.
- Sintonizar los parámetros del controlador para llegar a la posición del vástago deseada mediante bucle cerrado a través de una tarjeta Regulador PID.
- Realizar el modelamiento del sistema físico (hidráulico y electrónico) mediante herramientas computacionales tomando en cuenta las no linealidades del sistema.

## **1.3. Justificación**

### **1.3.1. Justificación Técnica**

- Experimentación del uso del bucle cerrado de hidráulica proporcional, especialmente aplicaciones de posicionamiento, con mayor énfasis en las tarjetas analógicas controladoras PID, se prefirió usar un transductor acoplado a un cilindro ya existente.

### **1.3.2. Justificación Académica.**

- Complementar con el estudio de aplicaciones de hidráulica parecidas a las de la industria con tarjetas de control PID como el control de posición.
- Dar a conocer el potencial de este tipo de controladores en los laboratorios, no solo de hidráulica o neumática, también de electrónica.
- Generar mayor interés de investigación y desarrollo en áreas de Control Hidráulico.

## 1.4. Descripción del problema

Siendo este tipo de proceso de importancia en la industria, no se cuenta con este tipo de aplicación en el laboratorio de Oleohidráulica y Neumática, por lo tanto, es que se propone el presente proyecto atacando esta falta; desarrollando esta aplicación de la hidráulica proporcional, específicamente el control PID, para esto es necesario acondicionar y contar con los equipos y accesorios adecuados que permitan el correcto aprendizaje, en este caso el control preciso de la posición del extremo final del vástago del cilindro hidráulico.

Cabe mencionar que existe poca documentación acerca del tema, siendo esta una aplicación muy importante en el campo de la hidráulica.

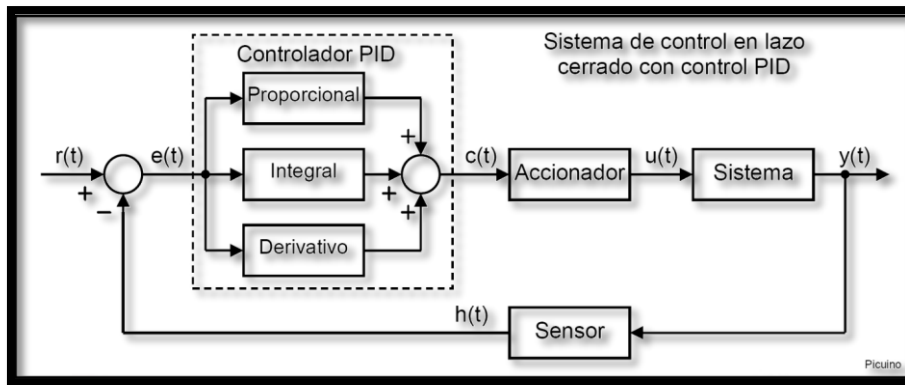


**Figura 1.1.** Cilindro Hidráulico de doble Efecto

*Fuente: (Festo)*

Como se observa en la figura 1.1 este será el tipo de actuador seleccionado para realizarle el control.

En la siguiente figura, se muestra un diagrama de bloques que representa un lazo cerrado de control, se observan todas las partes que componen el lazo: Señal de consigna, controlador, planta y sensor.



**Figura 1.2.** Diagrama de Bloques de un Controlador PID  
*Fuente: (Ogata)*

## 1.5. Antecedentes

### 1.5.1. Antecedentes Locales

**Morales y Valdivia (Arequipa, 2017) “IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR HIDRAULICO CON TARJETAS PID APLICADO AL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA EPIMMEM DE LA UCSM”**

En este trabajo se usa las tarjetas electrónicas llamadas “Regulador PID” de la marca Festo®, para hacer un control de velocidad de motor hidráulico, aunque esta tesis no da una explicación clara del funcionamiento, nos muestra que es posible realizar control PID sin la necesidad de un controlador tipo PLC, ya que la tarjeta Regulador PID en conjunción con amplificadores electrónicos y generadores de set points y un transductor acoplado al eje del motor, permite controlar la velocidad.

### 1.5.2. Antecedentes Nacionales

**Mendoza Fuente, Piero Fabrizio (Lima, 2013) “PERFORADORA DE ROCAS TELEOPERADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA, CON CONTROL AUTÓNOMO DEL BRAZO HIDRÁULICO EN UN GRADO DE LIBERTAD”**

En esta investigación se muestra el estudio aplicado al control de posición de un cilindro hidráulico, seleccionando los sensores y actuadores para la teleoperación de la maquinaria y el control del brazo perforador en un grado de libertad, tomando como referencia el jumbo hidráulico Boomer 282, demostraron que era posible realizar esta operación al seleccionar los sensores correctos.

### **1.5.3. Antecedentes Internacionales**

**Orellana Apolinario, Jorge (Ecuador, 2017) “MODELADO Y CONTROL DE POSICIÓN DE UN CILINDRO DE DOBLE EFECTO UTILIZANDO PID Y PID-DIFUSO CON MATLAB Y LABVIEW”**

El presente trabajo de tesis consiste en lograr conseguir el posicionamiento de un cilindro neumático doble efecto, mediante, primeramente hacer el modelado del sistema, mediante herramientas computacionales, a partir del modelo matemático, en el cual no se tomaron en cuenta todas las no-linealidades, se procede a diseñar dos tipos de controladores (PID clásico y PID difuso).

La conclusión que nos muestra esta investigación es que se observan ligeras diferencias en cuanto al desempeño y consumo de energía, mejorados por el PID difuso.

### **1.6. Alcances y Limitaciones**

El trabajo aquí presentado contempla diseño de un controlador PID, la obtención y establecimiento de parámetros estará basado de acuerdo al estudio del sistema (cilindro hidráulico) y al modelado del mismo usando herramientas computacionales, específicamente Matlab®.

Dado que el sistema en cuestión no es un sistema LTI, contiene no linealidades y hace muy dificultosa la labor del modelado mediante ecuaciones diferenciales o

funciones de transferencia, y peor aún, poder incluir todas las no linealidades inherentes de un sistema hidráulico.

Una limitación grande fue que al no poseer cilindros de distintas carreras para poder hacer pruebas sobre los distintos parámetros aplicables al controlador; también se dejó de lado las demás no linealidades que existen en el sistema como, por ejemplo, la viscosidad del aceite, la temperatura del aceite, el desgaste de la corredera de la válvula, el desgaste de los sellos del cilindro, el caudal suministrado por la bomba hidráulica, etc.

### **1.7. Ubicación Espacial y Temporal**

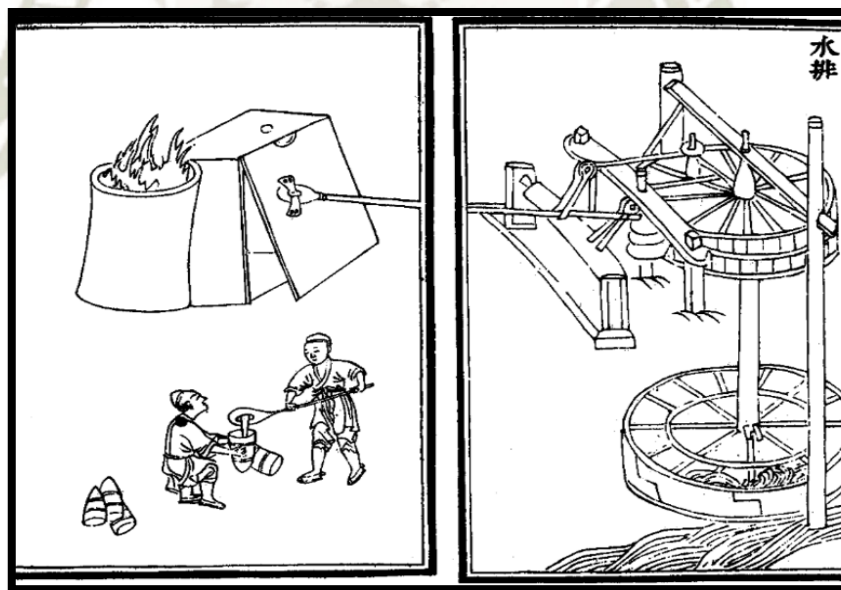
La presente investigación se realizó en la ciudad de Arequipa en la Universidad Católica Santa María en el Laboratorio de Oleohidráulica y Neumática entre los meses de Julio a diciembre del Año 2018.

## CAPITULO II

### 2. Marco Teórico

#### 2.1. Introducción

Desde tiempos antiguos, el hombre buscó poder resolver sus tareas cotidianas utilizando un menor esfuerzo al que le supondría hacerlo con sus propias manos, primeramente, usando la fuerza de los animales, luego perfeccionando mecanismos mecánicos, desde la China de la dinastía Song se desarrollaron mecanismos accionados mediante la corriente del río, tanto para martillos de molienda como para fuelles mecánicos para la cocción de ladrillos, como se aprecia en la siguiente figura.



**Figura 2.1.** Ilustración de los fuelles de un alto horno operados por medio de ruedas hidráulicas  
*Fuente:* (Nong Shu por Wang Zhen)

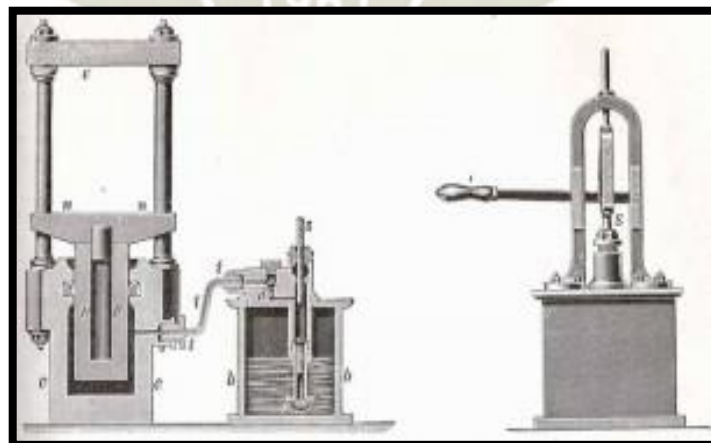
Gracias a la técnica hidráulica, en la actualidad la industria es capaz de realizar las más grandes fuerzas posibles. Actualmente, ninguna otra técnica es capaz de realizar

mayores fuerzas o pares de giro, al menos cumpliendo una relación potencia – tamaño aceptable.

La hidráulica ha proporcionado, al hombre, un método para hacer cosas que sin su uso no hubiera podido hacer. Está presente en los desarrollos tecnológicos más complejos, pero también forma parte de nuestra vida más habitual.

Los romanos utilizaban agua estancada en un punto elevado como ayuda en la minería. Acumulaban el agua poco a poco en un punto elevado, y después liberaban toda esa energía potencial de golpe dejándola caer a través de un complicado sistema de túneles excavados estratégicamente que literalmente “rompía” la montaña.

En 1795 se diseñó la primera prensa hidráulica para producción industrial, basada en agua como líquido transmisor de la energía. Su rendimiento no era muy bueno, además los materiales empleados para los cierres de aquella época no conseguían sellar (encerrar) el agua de una forma estanca, pues solían ser de cuero y no se conseguía presurizar las instalaciones o al menos no conseguían hacerlo por mucho tiempo.



**Figura 2.2.** Prensa hidráulica  
*Fuente: (Vickers)*

Su principio de funcionamiento es simple: utiliza el fluido para transmitir energía, la energía de la persona que mueve un pequeño pistón y que se aplica sobre un pistón más grande: esto multiplica fuerzas y reduce la cantidad de movimiento haciendo posible mover muy poca distancia un elemento con mucha fuerza, en realidad es lo que sucede con la ley de la palanca.

Con el descubrimiento de oro en 1848 en la localidad de Sutter's mill, California, los mineros empezaron a utilizar el agua acumulada a cientos de metros por encima de ellos en las montañas. El agua proyectada a gran presión en un chorro de tan solo 23 cm de diámetro a 70 kg/cm<sup>2</sup> por el que circulaban más de 114.000 litros de agua por minuto, era empleada para levantar y mover tierra y rocas de valles y montañas enteros.

Más tarde el descubrimiento de petróleo contribuyó a un nuevo y espectacular avance de la hidráulica. Gracias al petróleo aparecieron nuevos polímeros cuyo uso se generalizó, y con estos apareció el tal vez más famoso elemento de cierre: la junta tórica (O-ring).

El petróleo también brindó los aceites minerales derivados que incluso hoy se siguen usando en este campo: aceites hidráulicos de origen mineral.

Posteriormente el uso de la hidráulica se extendió a los frenos de los automóviles, actualmente la tendencia es el uso de una dirección asistida eléctrica, pero durante mucho tiempo, la asistencia ha sido únicamente hidráulica.

Todos los campos de producción, llámese manufactura, construcción, minería necesitan y prescinden de energía hidráulica para poder llevar a cabo, por ejemplo, el prensado de chapas de acero, el transporte de materiales con camiones volquetes, etc.

## 2.2. Hidráulica

La palabra oleohidráulica define de una forma más acertada las operaciones para convertir energía hidráulica en movimientos lineales o rotativos, la palabra oleohidráulica es un término que no aparece en la RAE, por ello acordamos nombrarla simplemente como “hidráulica”.

“El principio precursor de la Oleohidráulica es la Ley de Pascal la cual sostiene que la Presión en cualquier punto de un fluido sin movimiento tiene un solo valor, independientemente de la dirección y ejerce Fuerzas Iguales”. (Roca, 1999)

“La hidráulica es utilizada básicamente en los fluidos hidráulicos como medios de presión para mover pistones de los cilindros, sus principales aplicaciones radican en los dispositivos móviles”. (Creus, 2007)

Adicionalmente Vickers (1997) nos dice que “el estudio de la hidráulica tiene que ver con el uso y caracterización de los líquidos”.

### 2.2.1. Clasificación la Hidráulica

La hidráulica puede ser clasificada bajo distintas ópticas, teniendo distintos criterios según sus campos aplicativos o según su tipo de control o accionamiento:

#### 2.2.1.1. Clasificación según campos aplicativos:

En esta clasificación se da mayormente por el tipo de movilidad de los elementos que componen el circuito hidráulico, a su vez que ambos tipos tienen diferentes aplicaciones en los campos de la industria moderna

En la figura 2.3 se recopila una clasificación según los campos aplicativos de la hidráulica.

<b>Clasificación de la hidráulica según sus campos aplicativos</b>	
<b>Hidráulica estacionaria</b>	Prensas
	Lijadoras
	Clasificadoras
	Líneas de producción
	Simuladores de vuelo
<b>Hidráulica móvil</b>	Simuladores de sismos
	Maquinaria pesada
	Automóviles
	Maquinaria agrícola

**Figura 2.3.** Clasificación de la hidráulica según sus campos aplicativos

*Fuente: Elaboración propia.*

### 2.2.1.2. Clasificación según el tipo accionamientos

Para la segunda gran clasificación, tenemos según el tipo de accionamiento de los elementos de control de los actuadores, en este caso las válvulas (de accionamiento manual, eléctricas, proporcionales, etc), ya que en los tres tipos se usan los mismos actuadores finales (motores, cilindros).

Tenemos las siguientes:

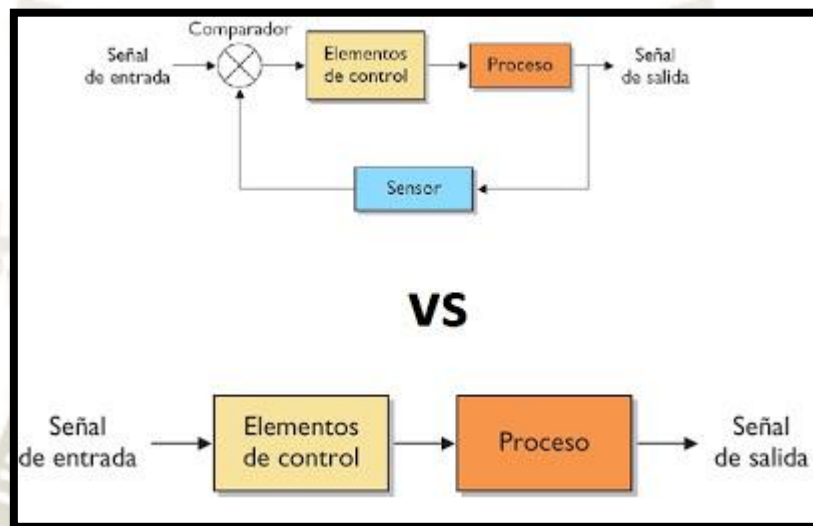
- Hidráulica pura.
- Electrohidráulica.
- Hidráulica Proporcional.

### 2.2.1.3. Clasificación según su tipo de control

La clasificación según su tipo de control, tenemos el control de lazo abierto y el control de lazo cerrado

- **Lazo abierto:** su control solo se basa en una sola acción de mando, sin tener en cuenta la realimentación del sistema, se usa para operaciones simples, en las que no se requiere saber el estado del sistema en cada momento.

- **Lazo cerrado:** el control se realiza teniendo en cuenta la realimentación, ya sea del sistema completo o de cada válvula por separado, por ejemplo, las válvulas proporcionales que cuentan con sensores de desplazamiento LVDT conectados mecánicamente al spool o carrete de la válvula.



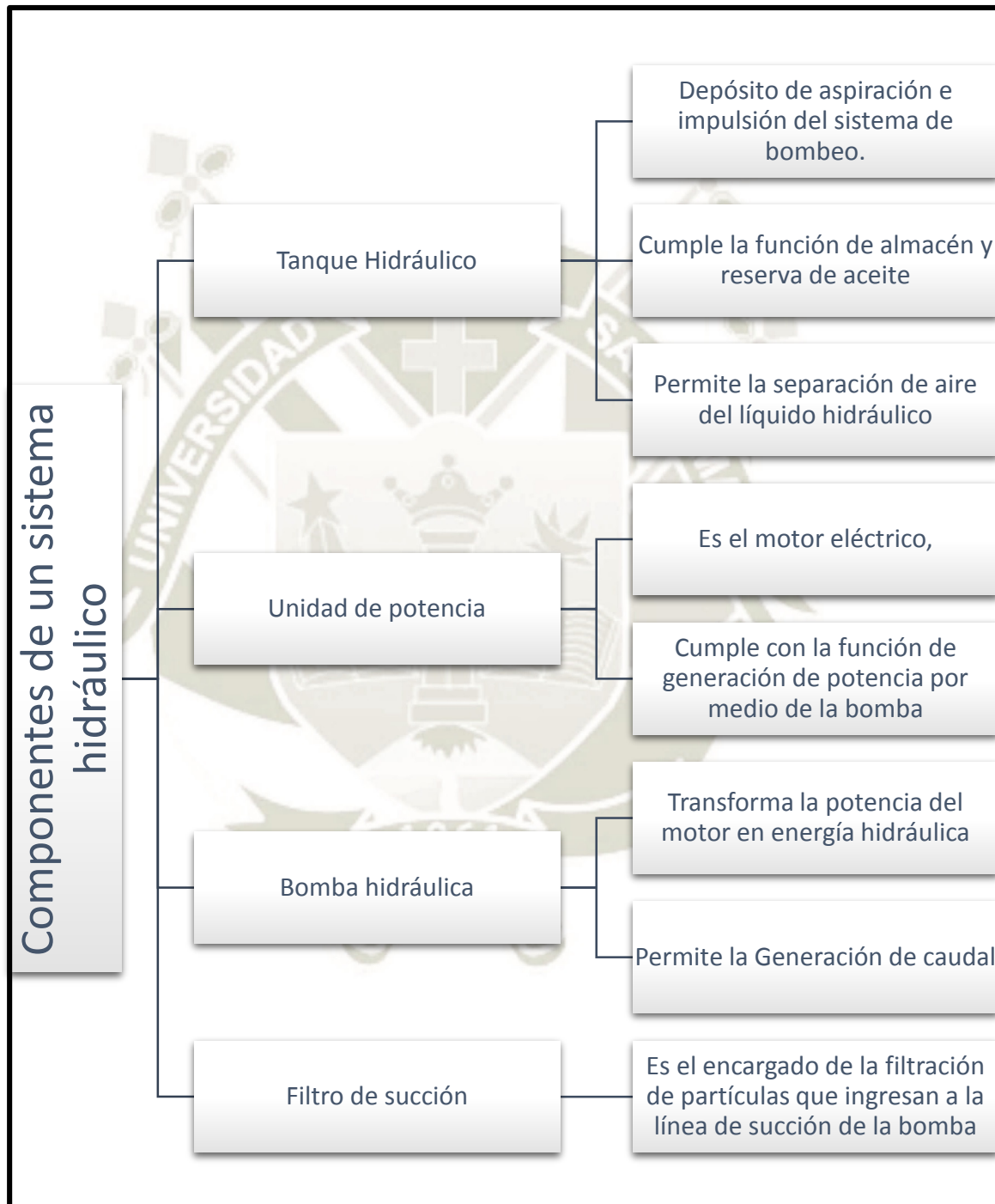
**Figura 2.4.** Lazo abierto vs Lazo cerrado.

**Fuente:** <http://tecnologiagama2000seda.blogspot.com/2016/04/tipos-de-sistemas-de-control.html>

En esta figura podemos apreciar la diferencia notable entre los dos tipos de control, son muy pocos los casos en las que se aplica control en lazo abierto, por ejemplo, en los sistemas más sencillos como el de un tanque de agua y una boya; en la industria y en los procesos productivos en general, siempre se aplicará en lazo cerrado.

### 2.2.2. Componentes del sistema hidráulico

Para una mejor comprensión de las funciones principales que cumple cada componente, revisaremos el siguiente mapa conceptual, no estudiaremos cada uno por detallado, puesto que más adelante describiremos los que se usan mayormente para aplicaciones de hidráulica proporcional.



**Figura 2.5.** Descripción de componentes de un circuito Oleohidráulico.

*Fuente:* Serrano (2002)

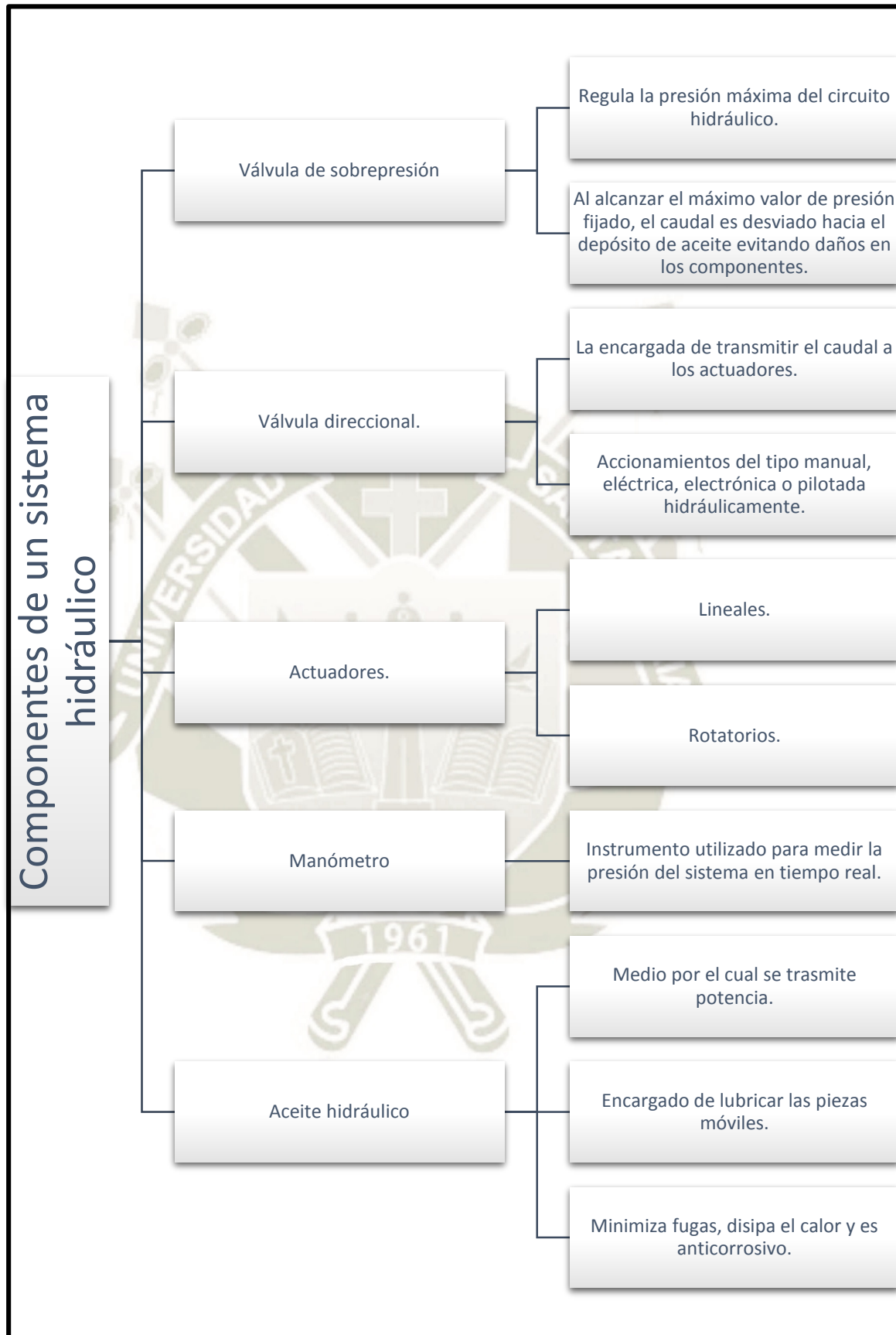
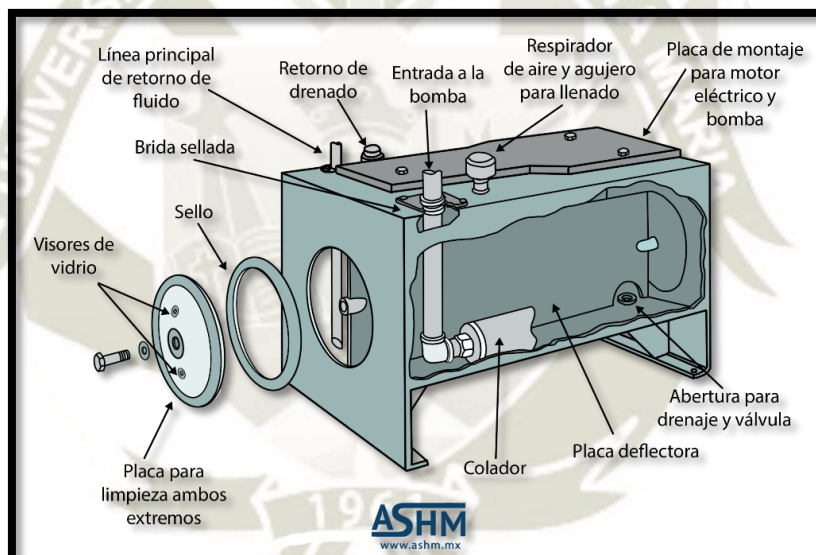


Figura 2.6. Descripción de componentes de un circuito Oleohidráulico.

Fuente: Serrano (2002)

### 2.2.2.1. Unidad hidráulica

El depósito cumple varias funciones, la principal es servir de almacenamiento para el fluido hidráulico requerido por el sistema, deben de ser sellados para evitar que se ensucie el aceite pero deben contar con una ventilación con filtro, los depósitos ayudan a disipar el calor generado por el sistema, deben contar con 2 cámaras divididas por una placa intermedia, en la que el aceite pueda asentarse, dejando que los contaminantes se sedimenten, separarse de las burbujas y enfriarse para poder pasar a la zona de succión lo más frío posible, ya que así recupera viscosidad.



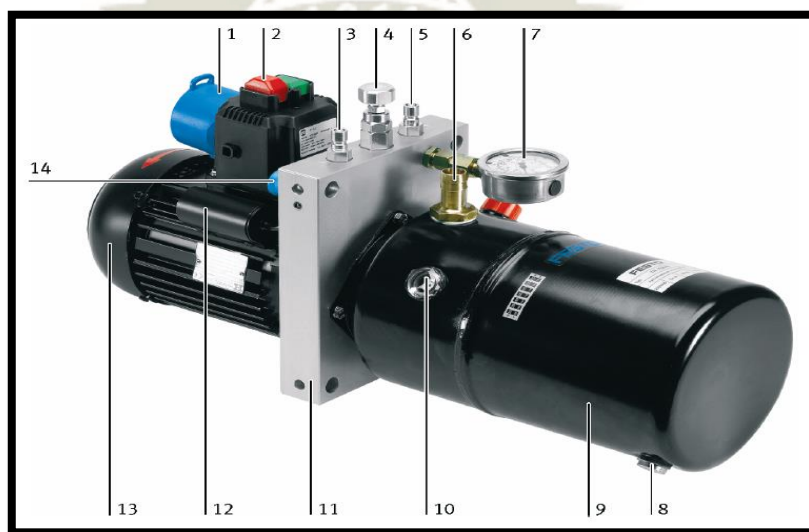
**Figura 2.7.** Depósito Hidráulico.

Fuente: <http://www.ashm.mx/blog/construccion-de-tapa-superior-plana/>

La bomba es capaz de elevar la presión de todo fluido Hidráulico y poder proporcionar el Caudal a todos los dispositivos comprendidos del sistema. Un paso fundamental en cuanto a la utilización de las Bombas es la Selección, por lo tanto, los factores que se toman en cuenta principalmente son la presión, el caudal, el nivel de ruido, el rendimiento a nivel volumétrico y los costes.

Festo Didactics nos da la siguiente definición:

El paquete de potencia hidráulica convierte la energía eléctrica en potencia de accionamiento hidráulica. El motor eléctrico (13) acciona una bomba de engranajes (17). El aceite se alimenta desde el tanque (9) a través del tubo de succión (15) y se aplica al puerto de presión. La presión se puede leer en el manómetro (7). La bomba entrega un caudal virtualmente constante. El valor máximo de presión se ajusta mediante la válvula de alivio de presión (4). Esta presión solo se puede mantener hasta la tasa de suministro máxima de la bomba. Si el circuito hidráulico conectado requiere un caudal más alto, la presión fallará. La presión que prevalece en este punto se adapta a la resistencia al flujo del circuito conectado, por lo que el caudal, por ejemplo. En un circuito de derivación de la bomba, regrese a baja presión. El flujo de retorno se efectúa a través de la conexión del tanque T (3) a través del filtro de retorno (16) al tanque (9). Se ha provisto un zócalo de acoplamiento rápido azul (14) para el flujo de retorno del depósito de presión. El nivel de llenado se puede leer desde el visor (10). El flujo de retorno del tanque de medición de descarga se dirige a través de la conexión (6).



**Figura 2.8.** Unidad de potencia hidráulica

*Fuente: Festo Didactics (2013)*

### 2.2.2.2. Válvula limitadora de presión

Otro elemento fundamental en las instalaciones hidráulicas es la válvula limitadora de presión, su función principal es la de proteger a los sistemas de la sobrepresión que puede generar el sistema hidráulico y conservar una presión determinada en partes relevantes del circuito. La mayoría de sistemas hidráulicos están diseñados para funcionar con un intervalo de presiones preestablecido; si estas fuerzas no se controlan o limitan, los componentes eléctricos y el equipo podrían sufrir daños con graves consecuencias económicas. Estas válvulas evitan una acumulación de presión o vacío excesivos que podría desequilibrar el sistema; es decir, actúan como dispositivos de seguridad que limitan la presión máxima del sistema liberándola cuando aumenta demasiado.

Nuestro grupo hidráulico cuenta con una válvula limitadora de presión conectada al puerto de presión de la bomba y es ahí directamente que se puede variar la presión de trabajo del sistema, adicionalmente se puede colocar otras en el circuito donde también puede actuar como un freno hidráulico o para generar contrapresiones.



**Figura 2.9.** Válvula limitadora de presión

*Fuente: Festo Didactics (2013)*

### 2.2.2.3. Válvulas direccionales

“Las válvulas direccionales son componentes oleohidráulicos encargados de dar el paso al fluido hidráulico por un conducto.” (Serrano. 2002. Pg. 177)

Topología de las válvulas direccionales:

- Válvulas direccionales de asiento: Poseen un Desplazamiento Corto, requiriendo de fuerza de accionamiento poseen una perfecta estanquidad sin fugas; permiten trabajar con grandes presiones, no se agarrotan, su mantenimiento es fácil y tienen una larga vida. El mando puede ser manual, mecánico o eléctrico, además de directo e indirecto.
- Válvulas direccionales de corredera: Las válvulas de corredera poseen un desplazamiento más largo, exigen poca fuerza de accionamiento, su estanquidad es menor, pueden tener fugas, son de construcción sencilla y son aptas para cumplir múltiples funciones.

### 2.2.2.4. Válvulas reguladoras de caudal

Las válvulas reguladoras de caudal tienen como función principal la modificación y regulación del caudal, es decir controlar la cantidad de aceite que es conducida hacia los actuadores o componentes de trabajo. El caudal es limitado por la acción de dicha válvula por lo que el restante es enviado hacia el Depósito.

Tenemos las válvulas de estrangulación y anti-retorno, y las válvulas reguladoras de caudal, la principal diferencia entre estas es que, las primeras solo reducen el caudal, mientras que las segundas, compensan la reducción de velocidad en el caso de que el actuador está sometido a una carga que lo haría más lento, esto al tener un mecanismo más complejo en su interior.

## 2.3. Hidráulica Proporcional

En esta parte de la hidráulica centraremos nuestro estudio ya que es la que mayor número de aplicaciones nos permite y se equipara en flexibilidad con los accionamientos eléctricos.

Las servoválvulas surgieron de la necesidad de poder tener más control sobre las válvulas hidráulicas direccionales existentes, hasta ese momento las válvulas todo/nada (ON/OFF) sean eléctricas o mecánicas, ya que se reconoció una gran limitación, esta parte de la hidráulica vino de la mano de la ingeniería aeroespacial en la década del 50.

Estas incipientes servoválvulas fueron utilizadas en sistemas de lazo cerrado y sus primeras aplicaciones fueron en las aeronaves, en la actualidad, son muchos los campos del quehacer humano en el que se utilizan este tipo de tecnología como la minería, agricultura, procesamiento de materiales y robótica.

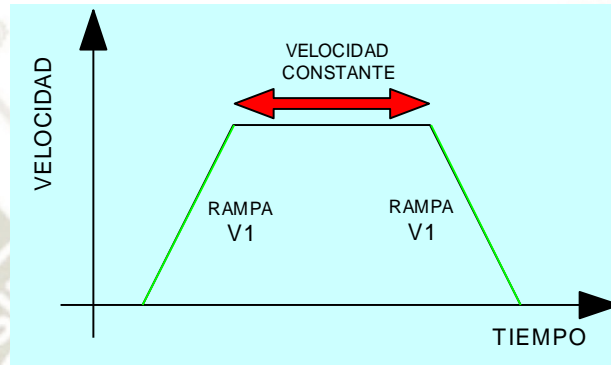
Durante casi 20 años, existió una gran brecha entre las servoválvulas y las electroválvulas, no fue hasta la década del 70 que surgen las válvulas proporcionales, ya que su precisión mecánica no era tan alta como el de las servoválvulas, su comportamiento dinámico era inferior.

Actualmente existen 2 tipos de válvulas proporcionales, las “unrefined” y las de altas prestaciones, gracias a la ingeniería de control, comparando con las servoválvulas, esta brecha se ha ido haciendo más pequeña.

A pesar de que los accionamientos eléctricos han ganado bastante terreno por su alto desempeño en el control de movimiento, la hidráulica proporcional sigue teniendo una gran variedad de aplicaciones a nivel industrial.

Algunas aplicaciones de la hidráulica proporcional:

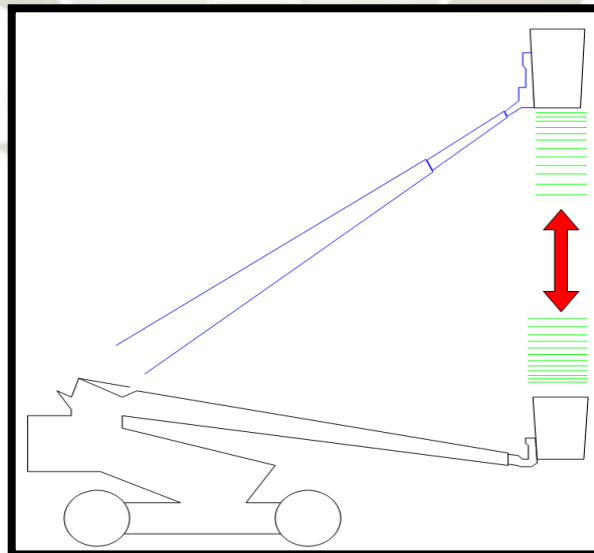
- Maquinaria pesada.
- Plantas de procesamiento de metales.
- Robótica.
- Simuladores de movimiento y de vuelo.
- Máquinas de ensayo de temblores, etc.



**Figura 2.10.** Secuencia con rampas para un elevador hidráulico.

*Fuente: Serrano (2002)*

Como se ve en la anterior figura, un ejemplo claro es la utilización de rampas para generar velocidades constantes.



**Figura 2.11.** Esquema de elevador hidráulico.

*Fuente: Serrano (2002)*

La combinación de las grandes fuerzas y torques que proporciona la hidráulica proporcional, con la ingeniería de control, han permitido el desarrollo de sistemas que nos dan una alta precisión y flexibilidad para el control de variables tales como la posición lineal, posición angular, velocidad lineal y angular, fuerzas y torques.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores fuerzas y torques.</li> <li>- Mejor relación potencia – tamaño.</li> <li>- Autolubricación.</li> <li>- Mayor velocidad de respuesta con grandes cargas.</li> <li>- Trabajan en diferentes condiciones de funcionamiento.</li> <li>- Protección a sobrecargas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Más costosos</li> <li>- Riesgo de incendio y explosión</li> <li>- Susceptibilidad a fluidos sucios</li> <li>- Componentes no lineales</li> <li>- Más ruidosos.</li> </ul>

**Figura 2.12.** Comparativa Ventajas-desventajas de la hidráulica proporcional frente a los Accionamientos eléctricos

*Fuente: Manual Bosch-Rexroth*

Como se apreció en la anterior figura, la hidráulica es un campo de la ciencia que se sigue usando frente a uno de sus competidores en la industria como lo son los accionamientos puramente eléctricos, esto se debe, como se mostró, a que se logra mayor fuerza y torque, respuestas más suaves, control preciso, etc.

Algunas ventajas y desventajas generales de los sistemas proporcionales

Ventajas:

- Mejoramiento de la calidad y productividad a través del control continuo de variables como posición, velocidad, presión, torque.
- Mayor flexibilidad en las aplicaciones industriales (programación de mandos y control de acciones).
- Permiten mover suavemente grandes masas con velocidades y aceleraciones elevadas.

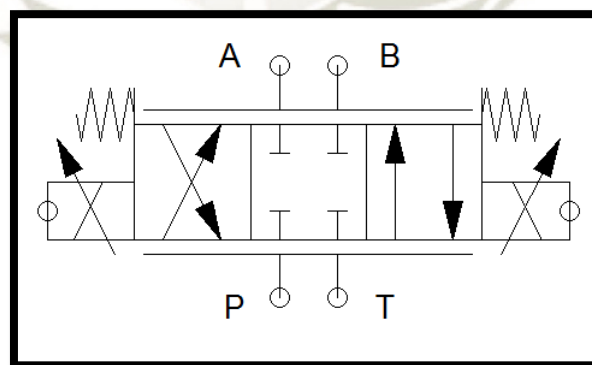
Desventajas:

- Mayores costos.
- Mantenimiento más sofisticado.
- Requieren de personal más capacitado para desarrollar los controles o la automatización.
- Requiere de un equipo de diagnóstico de fallas.

Es muy importante esta rama de la hidráulica ya que el futuro de los sistemas electrohidráulicos es llegar al control en lazo cerrado, ya que se exige un control preciso, una respuesta rápida y flexibilidad de programación

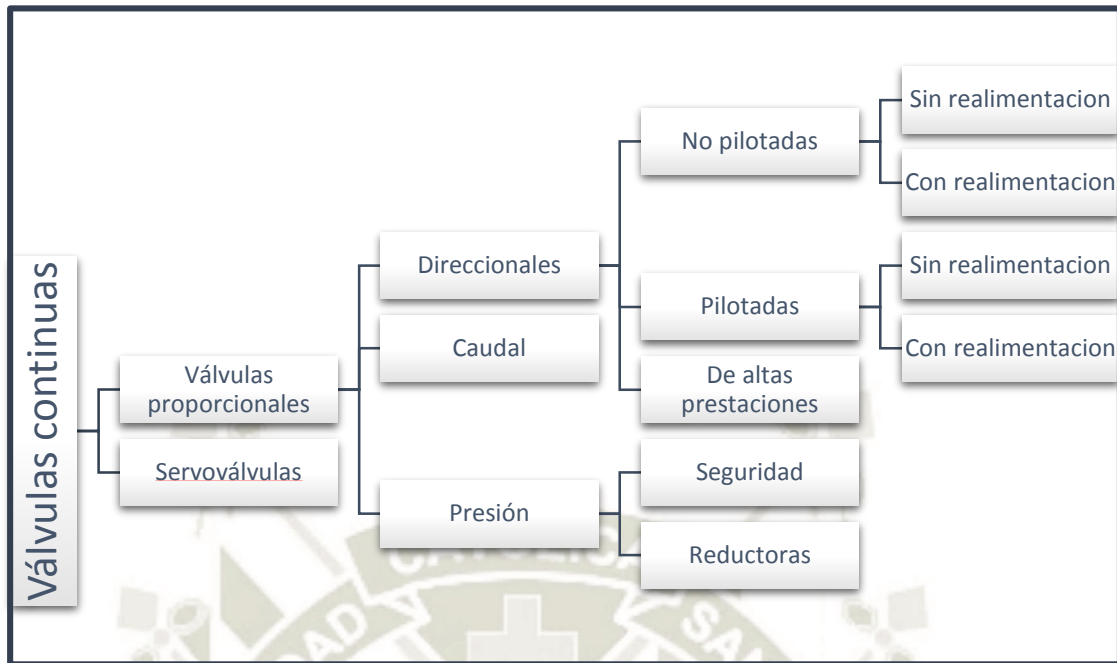
### 2.3.1. Válvulas continuas

Las válvulas proporcionales, también llamadas continuas, son válvulas de infinitas posiciones en las cuales se cumple que: la magnitud de salida (caudal, presión, posición del carrete o spool) es proporcional a la magnitud de la señal de entrada (corriente continua), en la figura se ve la representación de la válvula 4/3 según la norma ISO 1219.



**Figura 2.13.** Simbología válvula continua de 4/3.  
*Fuente: (Festo, Hidráulica Proporcional Nivel Básico, 1996)*

Según el manual Vickers de Hidráulica, las válvulas continuas se pueden clasificar de la siguiente manera, tal como se muestra en la figura.



**Figura 2.14.** Tipos de válvulas continuas.

*Fuente: Manual Bosch-Rexroth*

Las válvulas continuas se dividen en 2 grandes ramas: las válvulas proporcionales y las servoválvulas, aunque su objetivo es el mismo, como se verá a continuación presentan algunas diferencias.

<b>Servoválvulas</b>	<b>Válvulas proporcionales</b>
- Precisión mecánica extrema.	- Menor precisión
- Requieren de más elementos de regulación.	- Menos elementos de regulación.
- Menor tolerancia a la suciedad del aceite	- Un poco más tolerantes a la suciedad
- Respuesta dinámica superior.	- Respuesta dinámica buena.
- Se trabajan casi siempre en lazo cerrado	- Pueden trabajar el lazo abierto y lazo cerrado
- Más costosas.	- Menos costosas.

**Figura 2.15.** Comparativa Servoválvulas vs Válvulas proporcionales

*Fuente: Manual Bosch-Rexroth*

Según el manual de hidráulica Bosch-Rexroth y como se muestra en la siguiente figura, divide la hidráulica proporcional, específicamente las válvulas de acuerdo a la función que realiza, tenemos función direccional, función caudal y función presión, y también nos muestra que para poder comandar todos los tipos de válvulas

necesitamos un elemento llamado: el amplificador electrónico, este será el componente que enlaza la señal de control y la señal de potencia.

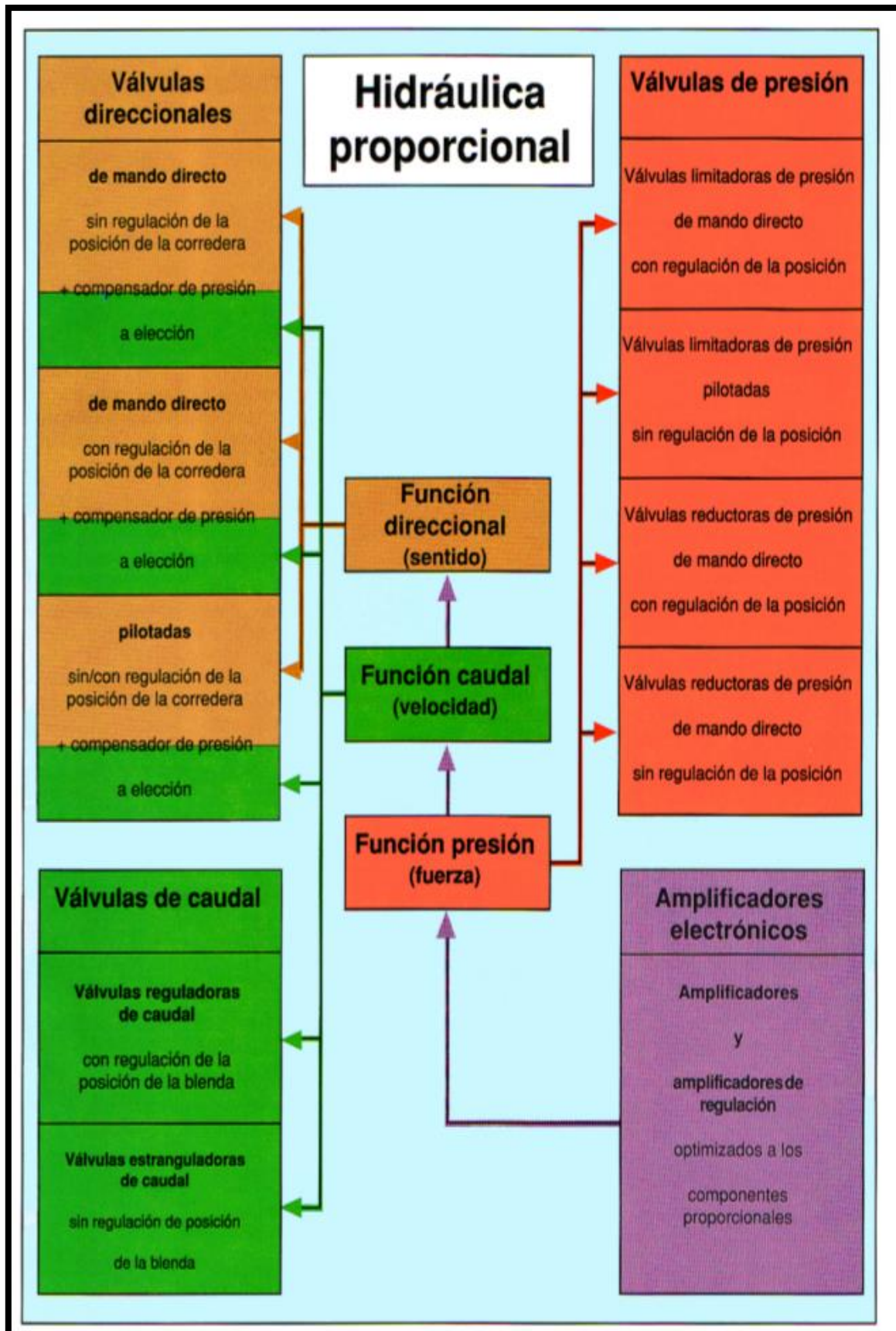
A su vez, también es válida la clasificación de acuerdo al tipo de control, mando y el desempeño de las válvulas, como se muestra en la figura.



**Figura 2.16.** Clasificación de acuerdo al control, mando y desempeño

*Fuente: Hidráulica de Vickers*

Una clasificación un poco más jerarquizada nos muestra Vickers para la clasificación de las válvulas y le añade un elemento primordial para el funcionamiento de dichas válvulas: el amplificador electrónico.



**Figura 2.17.** Válvulas proporcionales y funciones realizables con las mismas

*Fuente: Manual Bosch-Rexroth*

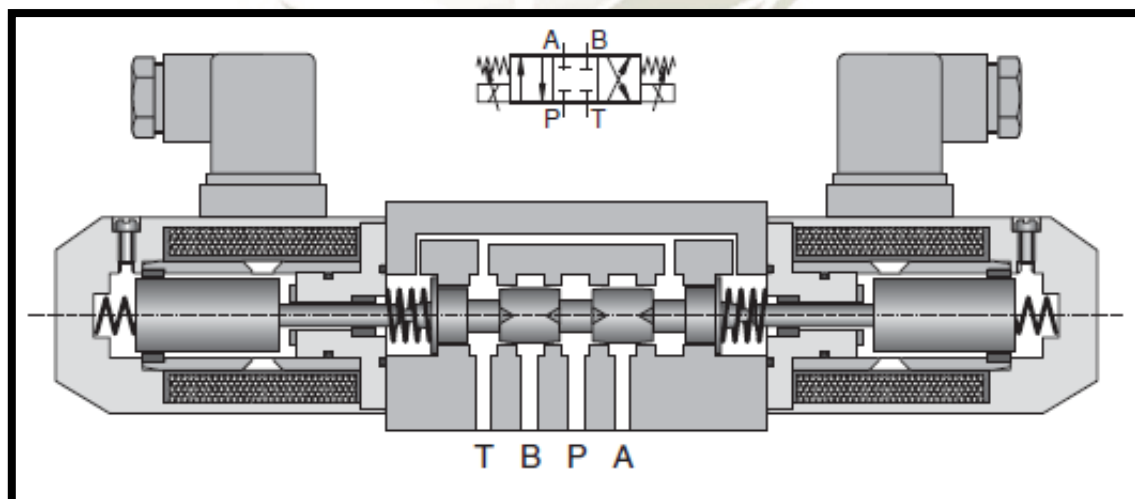
### 2.3.1.1. Válvulas direccionales no pilotadas sin realimentación

El diseño de una válvula distribuidora proporcional se parece al de una válvula conmutadora de 4/3 vías, ya que el caudal es regulado eléctricamente y posee las mismas 4 conexiones de trabajo.

La válvula se compone de un cuerpo con dos solenoides a los extremos (de carrera regulada), dos resortes que cumplen la función de centrar el spool, y cuatro puertos (P, T, A y B); al ser una válvula simple, el solenoide actúa directamente sobre el spool.

Si la señal eléctrica es cero, entonces ambos solenoides están sin excitar y la corredera se mantiene centrada por los muelles, si la corriente es negativa, el solenoide de la derecha se activa, dando lugar a que las conexiones: de P a B, y de A a T; caso contrario si la señal es positiva, el aceite fluye de P a A y de T a B; en el caso de un fallo de tensión, la corredera se desplaza a la posición media.

En la figura 2.18, tenemos el corte transversal que se le dio a la válvula de la marca Vickers, en todo caso sea el fabricante que fuere, la mayoría tiene un diseño parecido.



**Figura 2.18.** Corte transversal válvula 4/3

*Fuente: Festo (1996)*

### 2.3.2. Amplificador electrónico

Una gran parte de válvulas continuas requieren un elemento capaz de comandar la válvula; decimos una gran parte ya que otras traen acoplado este elemento en su mismo cuerpo; este elemento es el amplificador, convirtiendo una señal de control en una de potencia, en nuestro caso, el amplificador convierte la señal eléctrica (voltaje) de  $\pm 10$  VDC a una corriente continua de hasta 1 Amp.

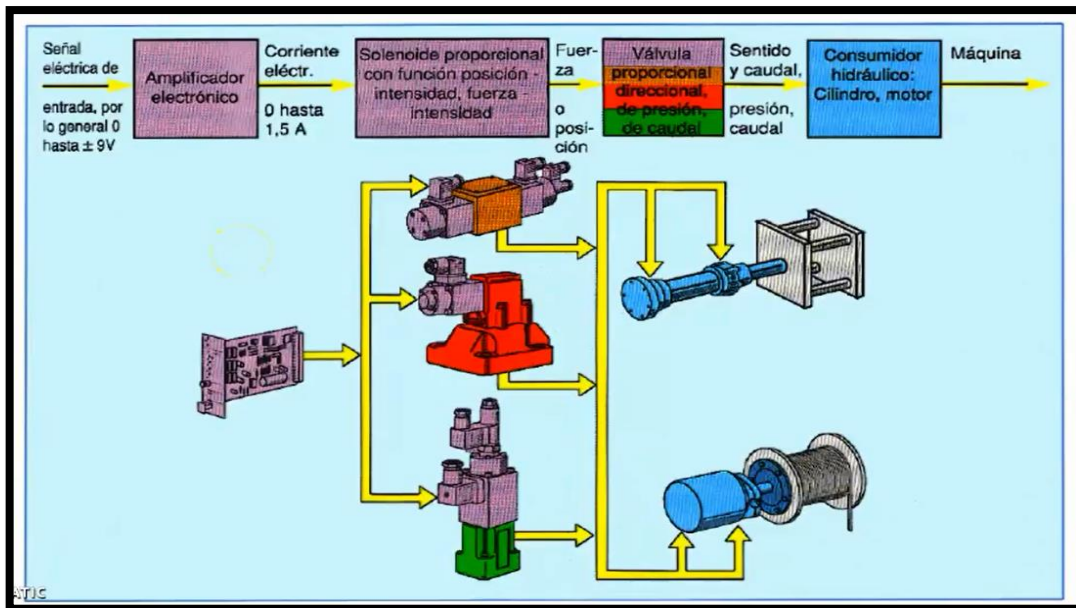
Dependiendo del tipo de amplificador, pueden contener:

- Elementos de corrección: su objetivo es compensar la zona muerta de la válvula.
- Modulador de ancho de pulso
- Etapa final de amplificación: proporciona la capacidad eléctrica requerida
- Fuente de tensión: para la alimentación del sistema de medición inductivo
- Sistema de realimentación para válvulas pilotadas
- Regulador en bucle cerrado: realiza una comparación entre las variables de corrección preparadas y la posición de la armadura.

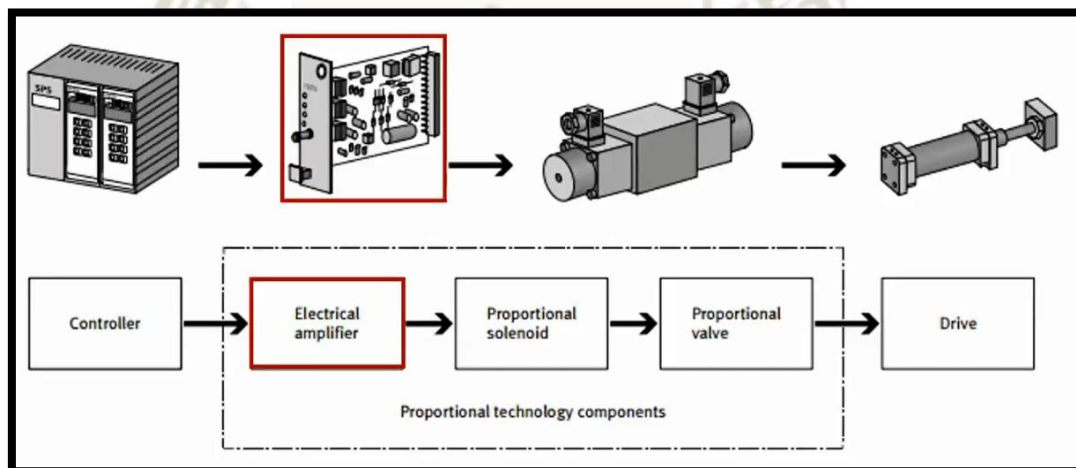
El amplificador de Festo, puede funcionar como un amplificador de dos canales y como dos amplificadores independientes de un solo canal, remitirse al anexo para mayor alcance.

La señal de control puede venir de un PLC, generador de señales o de un ordenador conectado a una tarjeta de adquisición de datos.

Como se aprecia en la siguiente figura, tenemos un diagrama de bloques que representa el camino que sigue la señal de control y sus transformaciones hasta convertirse en la señal de potencia que será entregada a la válvula y por consiguiente al actuador.



a)



b)

**Figura 2.19.** Diagrama de bloques Amplificador electrónico

*Fuente: Manual Bosch-Rexroth*

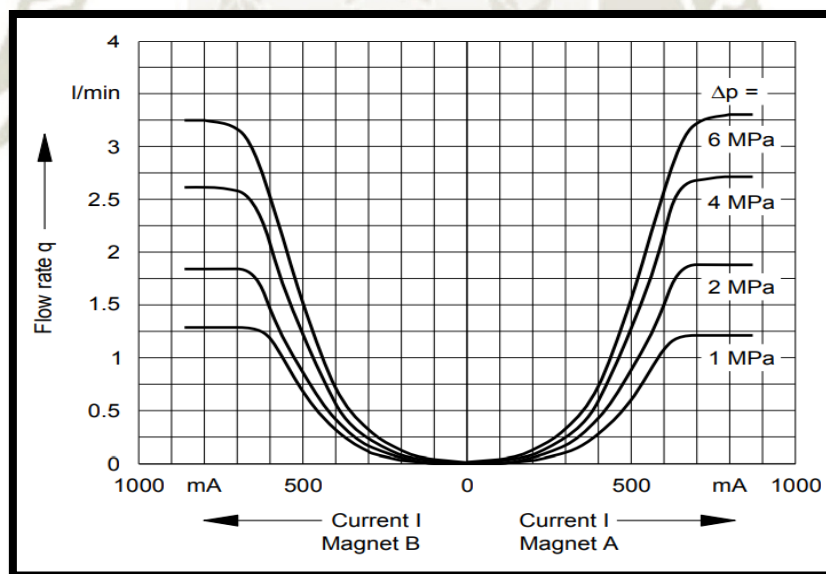
El controlador genera una señal de entrada de  $\pm 10$  VDC, el amplificador se encarga de convertirla en una señal de corriente que se conectará a los solenoides de la válvula proporcional, el movimiento de dichos solenoides, provocará que el spool de la válvula se mueva en mayor o en menor manera, traducido en dirección o presión.

### 2.3.3. Solenoides Proporcionales

Los solenoides son dispositivos electromecánicos capaces de convertir una señal de corriente de un movimiento lineal, en este caso al ser proporcionales, el movimiento de los mismos será en función de la cantidad de corriente que les llegue de parte del amplificador.

Este tipo de solenoides son de corriente continua y son húmedos (núcleo sumergido en aceite), la armadura del solenoide puede ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de carrera.

Estos solenoides a pesar de ser proporcionales, no son completamente lineales a lo largo de la carrera que recorren, es por eso que es necesario conocer la curva que estos describen versus la corriente aplicada en sus bornes

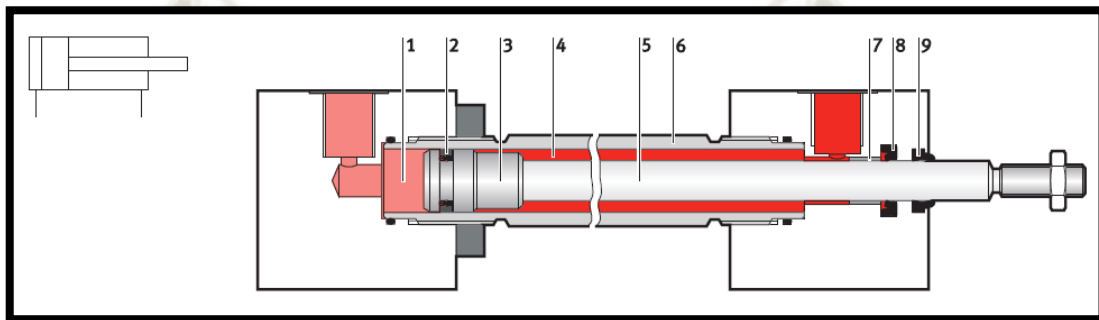


**Figura 2.20.** Curva característica Caudal-Señal  
*Fuente: Festo Didactics*

En la figura se aprecia que los solenoides tienen una zona muerta teórica que depende de la presión y caudal de funcionamiento del circuito, esta zona muerta real, se tiene que compensar al momento de ajustar los parámetros en el amplificador proporcional.

### 2.3.4. Actuador

El tipo de actuador aquí estudiado es un cilindro hidráulico doble efecto de 200 mm de carrera; en un cilindro de doble efecto puede aplicarse presión hidráulica en ambas superficies del émbolo. Por ello, estos cilindros pueden ejecutar un trabajo en ambos sentidos y son mucho más versátiles que los cilindros de simple efecto; en la siguiente figura se muestra el corte de un cilindro y sus partes, cortesía de Festo.



a)

Pieza	Denominación
6	Camisa del cilindro
3	Émbolo
1	Cámara del lado del émbolo
5	Vástago
4	Cámara del lado del vástago
7	Banda de guía
8	Junta del vástago
9	Anillo rascador
2	Junta del émbolo

b)

**Figura 2.21.** a) Cilindro de doble efecto: símbolo y corte b) Leyenda

**Fuente:** Manual Festo

En la anterior imagen vimos el corte longitudinal, podemos ver que el anillo rascador es una parte fundamental que evita que la suciedad ingrese en la cámara del vástago, la vida útil del cilindro se mide en la estanqueidad de las juntas.

Según manual Hidraulica básica TP501 de Festo:

Principio de funcionamiento de un cilindro de doble efecto:

- El líquido sometido a presión fluye hacia la cámara del cilindro del lado del émbolo. En esta cámara aumenta la presión, aplicándose una fuerza en la superficie del émbolo. Si esta fuerza supera la fuerza de la fricción estática, el émbolo avanza. La presión alcanza el nivel de presión de funcionamiento una vez que el émbolo avanzó completamente.
- Cuando el cilindro retrocede, el líquido sometido a presión entra en la cámara del lado del vástago. El émbolo retrocede y el líquido sometido a presión se evacúa de la cámara del lado del émbolo.

Entre los actuadores tenemos a los cilindros y los motores hidráulicos, entre los cilindros tenemos los siguientes tipos:

- Cilindro Simple efecto: Es un tipo de cilindros que hidráulicamente solo se moverá en un sentido, y el movimiento opuesto lo realiza por un medio mecánico, como puede ser un muelle, o por la ley de la gravedad. A simple vista se pueden identificar al tener solo una conexión hidráulica.
- Cilindro de doble efecto: Es un tipo de cilindros que genera movimiento en los dos sentidos por medio de la energía hidráulica. Tienen dos conexiones hidráulicas, una de ellas para extraer el pistón y la otra para contraer el pistón por medio de los componentes del circuito hidráulico.
- Cilindro de buzo: Es un tipo de cilindro que solo tiene una cámara, funciona como cilindro de simple efecto y retorna normalmente por la gravedad o al actuar sobre algún elemento mecánico como una palanca, etc. Suelen ser de este tipo los gatos, elevadores.

- **Cilindro Telescópico:** Es un tipo de cilindro hidráulico que puede ser de simple o doble efecto y que su principal característica es que se expande y contrae por medio de vástagos que van por tramos que uno está dentro del otro. Es útil para funciones que necesitan gran recorrido de vástago en comparación del tamaño del cilindro. Es utilizado en grúas, en ascensores accionados hidráulicamente, etc.



**Figura 2.22.** Cilindro telescópico

*Fuente:* <https://www.cicrosa.com/index.php/productos/cilindros-hidraulicos/>

### 2.3.5. Sensores

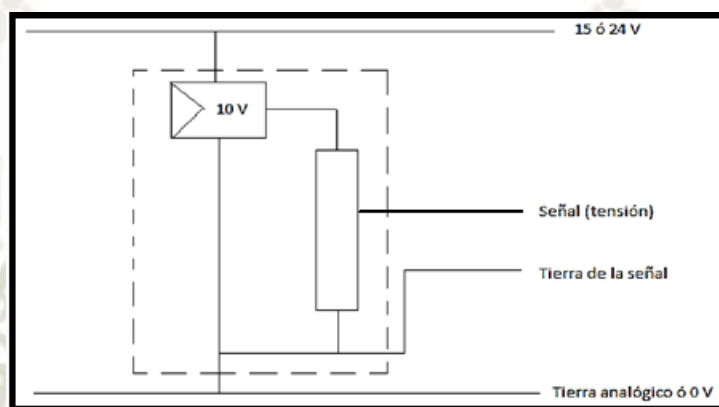
Uno de los pilares fundamentales de los sistemas de lazo cerrado, es el uso de sensores o transductores que hacen posible saber el estado del sistema, a través del bucle cerrado, realimentación o *feedback* como comúnmente se conoce; este elemento es de vital importancia ya que sin este, la señal de control que se le aplique al sistema puede causar cualquier efecto en el mismo menos el deseado, entonces no tendríamos control sobre el sistema y se volvería un lazo abierto.

Para poder controlar la posición se revisaron varios tipos de sensores, los cuales incluían (potenciómetros lineales, LVDTs, encoders lineales, ultrasónicos, etc.)

Esta información es enviada al sistema de control y se procesa para enviar las correcciones necesarias con la finalidad de que el pistón realice correctamente la trayectoria o posición deseada.

El rango de salida del transductor tiene que estar de preferencia en el rango de la señal de consigna y del controlador, puede ser 0-10 VDC, 4 a 20 mA o 0 a 10 mA.

En la siguiente figura se muestra las conexiones eléctricas de un potenciómetro.



**Figura 2.23.** Representación eléctrica de un potenciómetro lineal  
*Fuente: Festo (1996)*

En la siguiente figura se muestra el potenciómetro lineal tipo pistón, modelo que se usará, ya que al tener vástago el sensor y el cilindro, estos se pueden acoplar mediante una chapa de metal.



**Figura 2.24.** Potenciómetro lineal Modelo KPM12  
*Fuente: Shenzhen Miran Technology Co., Ltd, 2018*

## 2.4. Sistema de control

Para poder controlar efectivamente un sistema como el hidráulico en cuestión es necesario estudiar la teoría de control.

### 2.4.1. Conceptos preliminares importantes

#### 2.4.1.1. Error

El error es la diferencia que existe entre un valor medido y un valor de referencia. Basados en este concepto se dice, que para determinar el error que existe en el estado actual de un sistema con respecto a un valor de consigna o un estado deseado, se calcula la diferencia entre el estado actual del sistema (PV) y el valor de estado deseado o de referencia (SP). (Creuss. 2011)

#### 2.4.1.2. Exactitud

Se entiende por exactitud que el valor verdadero de la variable se pueda detectar sin errores sistemáticos positivos o negativos en la medición.

Sobre varias mediciones de la variable, el promedio de error entre el valor real y el valor detectado tenderá a ser cero. (Creuss. 2011)

#### 2.4.1.3. Precisión

El término precisión se refiere a que existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de la variable. La dispersión en los valores de una serie de mediciones será mínima.

#### 2.4.1.4. Velocidad de respuesta

Este concepto puede referirse a todo sistema, sensor o transductor debe ser capaz de responder a los cambios físicos de la variable detectada en el menor tiempo posible

#### **2.4.1.5. Zona Muerta**

La zona muerta (Dead Zone) es un intervalo en el cual un instrumento, sensor o transductor, no presenta variación en su respuesta. En este proyecto una de las principales fuentes de no linealidad es la zona muerta en la cual el cilindro de doble efecto no responde a un intervalo de variación que es determinado más adelante en este trabajo.

#### **2.4.1.6. Histéresis**

La histéresis representa el comportamiento de un instrumento al realizar una acción ascendente o descendente, este comportamiento es más detectable en instrumentos analógicos donde se observa una diferencia en las medidas de lecturas ascendentes y descendentes, aunque también suele ser detectable en instrumentos digitales.

#### **2.4.1.7. Ruido**

“Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados”. (Creuss. 2011)

#### **2.4.1.8. Linealidad**

Es la aproximación de una curva de la calibración o una línea recta específica, también se dice que es la característica de un dispositivo o sistema que puede describirse mediante una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes. En otras palabras, es el cambio de sesgo en el rango de operación normal.

#### **2.4.1.9. Máximo sobreimpulso**

Existe un sobrepaso cuando un sistema no está lo suficientemente amortiguado lo que produce que al querer alcanzar un estado el sistema se pase del valor deseado, este sobrepaso se expresa en porcentaje por lo que es conocido como “porcentaje de

sobrepaso”. El porcentaje de sobrepaso representa una sobre compensación del sistema y puede producir señales de salida peligrosamente grandes que pueden dañar un sistema.

### **2.4.2. Sistemas no-lineales**

Conocemos que la mayoría de los sistemas en la vida real no tienen un comportamiento lineal, a causa de ‘n’ factores, excepto en un determinado rango en los que sí pueden ser considerados medianamente lineales

Este tipo de modelos se pueden aproximar a uno lineal mediante el acercamiento alrededor de su punto de operación, también llamado linealización.

La desventaja de este método de linealización, es que no se logrará abarcar completamente el comportamiento del sistema a menos que se acerque a un punto de operación estable y se deberá obligadamente a recurrir a los modelos no-lineales.

Al existir una amplia variedad de modelos no lineales, es que no se puede seguir un “método” general para la identificación de sistemas, sino tratar de aproximar de acuerdo al modelo que se tenga.

Muchos sistemas no lineales pueden ser representados por la interconexión de sistemas lineales estacionarios y no linealidades estáticas. Estos modelos se denominan orientados a bloques (block-oriented nonlinear models). Las no linealidades estáticas aparecen por ejemplo debido a saturación de actuadores, sensores con características no lineales, etc. (Gomez, 2010)

Para poder “identificar” de manera más óptima un modelo, debemos conocer a grandes rasgos de qué tipo de sistema se trata, en nuestro caso, conocemos que, por ser un sistema hidráulico, está lleno de no-linealidades que pueden ir desde la

viscosidad del aceite a una determinada temperatura, hasta la histéresis del potenciómetro lineal.

Las propiedades más importantes de los sistemas lineales consisten en que les puede aplicar el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de excitaciones diferentes o entradas, es la suma de dos respuestas individuales. En consecuencia, en los sistemas lineales la respuesta a varias entradas puede calcularse tratando una entrada cada vez y después sumando los resultados. Como resultado del principio de superposición, Las complicadas soluciones de las ecuaciones diferenciales lineales se pueden obtener de las sumas de soluciones simples. Aunque las relaciones físicas con frecuencia se representan mediante ecuaciones lineales, en muchos casos las relaciones reales pueden que no sean del todo lineales. De hecho, un estudio cuidadoso de los sistemas físicos revela que los llamados sistemas lineales son realmente lineales dentro del rango de operación limitado. Por ejemplo, muchos de los sistemas hidráulicos y neumáticos involucran relaciones no lineales entre sus variables. En los sistemas no lineales, la característica más importante es que el principio de superposición no es aplicable. En general, los procedimientos para encontrar la solución a los problemas que involucran tales sistemas son extremadamente complicados. A causa de la dificultad matemática que representan los sistemas no lineales, con frecuencia es necesario linealizarlos alrededor de una condición de operación. Una vez que un sistema no lineal se aproxima mediante un modelo matemático lineal, lineales para propósito de análisis y diseño.

### 2.4.3. Modelamiento de sistemas

Se puede definir un modelo matemático como la descripción matemática del comportamiento del sistema. Muchas veces en el análisis de un sistema, inicialmente se obtiene un modelo matemático simple, como por ejemplo ignorando no linealidades y parámetros distribuidos (como en el caso de líneas de transmisión eléctrica), con el fin de obtener ecuaciones diferenciales lineales y de parámetros concentrados. (Giraldo y Tabares. 1997)

Cualquier tentativa de diseño de un sistema debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes de que el sistema pueda diseñarse en detalle o construirse físicamente. Tal predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama *modelo matemático*. Para los sistemas físicos, la mayoría de los modelos matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales. La dinámica de sistemas trata del modelado matemático y el análisis de la respuesta de los sistemas dinámicos.

El proceso de modelado, nos permite conocer cómo funciona la planta o sistema desde distintas ópticas ante diversas entradas

Tipos de modelamientos:

- Teóricos: se dan a partir de ecuaciones diferenciales que relacionan las variables de entrada y salida.
- Empíricos: lo obtenemos a partir del comportamiento externo entrada-salida del sistema, de aquí parte la Identificación

Podemos entender la identificación de sistemas como la acción de tratar de descubrir cómo es que se comporta el sistema de acuerdo a la observación de sus entradas y salidas.

El proceso de identificación consiste en obtener una representación del sistema a partir de la data disponible del mismo, generalmente esta tarea se lleva a cabo en dos etapas; la primera basada en el conocimiento previo del proceso, que estará dedicada a seleccionar el “tipo de modelo” (Baigiola, 2009, pag 97).

Ya que el software Matlab, será el elegido para realizar este proceso, debemos conocer lo que nos indica lo siguiente acerca del sistema de modelamiento.

System Identification Toolbox™ proporciona funciones de MATLAB®, bloques de Simulink® y una aplicación para construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada-salida. Le permite crear y usar modelos de sistemas dinámicos que no se pueden modelar fácilmente desde los primeros principios o especificaciones. Puede utilizar los datos de entrada y salida del dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia para identificar las funciones de transferencia de tiempo continuo y tiempo discreto, los modelos de proceso y los modelos de espacio de estado. La caja de herramientas también proporciona algoritmos para la estimación de parámetros en línea incrustados. La caja de herramientas proporciona técnicas de identificación tales como máxima probabilidad, minimización de error de predicción (PEM) e identificación del sistema subespacial. Para representar la dinámica del sistema no lineal, puede estimar los modelos de Hammerstein-Wiener y los modelos ARX no lineales con redes de wavelets, particiones de árbol y no lineales de redes sigmoideas. La caja de herramientas realiza la identificación del sistema de caja gris para estimar los parámetros de un modelo definido por el usuario. Puede usar el modelo identificado para la predicción de respuesta del

sistema y el modelado de plantas en Simulink. La caja de herramientas también admite el modelado de datos de series temporales y el pronóstico de series temporales. (Mathworks, 2016).

#### **2.4.4. Modelos Hammerstein-Wiener**

Cuando la salida de un sistema depende no linealmente de sus entradas, a veces es posible descomponer la relación entrada-salida en dos o más elementos interconectados. En este caso, puede representar la dinámica mediante una función de transferencia lineal y capturar las no linealidades mediante el uso de funciones no lineales de entradas y salidas del sistema lineal. El modelo Hammerstein-Wiener logra esta configuración como una conexión en serie de bloques estáticos no lineales con un bloque lineal dinámico. Las aplicaciones del modelo Hammerstein-Wiener abarcan varias áreas, como el modelado de sistemas electromecánicos y componentes de radiofrecuencia, procesamiento de audio y voz, y control predictivo de procesos químicos. Estos modelos tienen una representación de bloque conveniente, una relación transparente con los sistemas lineales y son más fáciles de implementar que los modelos no lineales de servicio pesado, como las redes neuronales y los modelos de Volterra.

Puede utilizar un modelo de Hammerstein-Wiener como estructura de modelo de caja negra porque proporciona una parametrización flexible para modelos no lineales. Por ejemplo, puede estimar un modelo lineal e intentar mejorar su fidelidad agregando una no linealidad de entrada o salida a este modelo. También puede usar un modelo de Hammerstein-Wiener como una estructura de caja gris para capturar el conocimiento físico sobre las características del proceso. Por ejemplo, la no linealidad de entrada puede representar transformaciones físicas típicas en los actuadores y la no linealidad de salida puede describir características comunes del sensor.

Los modelos de Hammerstein-Wiener describen sistemas dinámicos utilizando uno o dos bloques estáticos no lineales en serie con un bloque lineal. El bloque lineal es una función de transferencia discreta que representa el componente dinámico del modelo.

Este diagrama de bloques representa la estructura de un modelo de Hammerstein-Wiener:

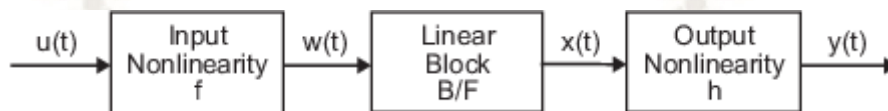


Figura 2.25. Diagrama de bloques H-W

Fuente: [www.mathworks.com/help](http://www.mathworks.com/help)

Dónde,

- $f$  es una función no lineal que transforma los datos de entrada  $u(t)$  como  $w(t) = f(u(t))$ .
- $w(t)$ , una variable interna, es la salida del bloque de no linealidad de entrada y tiene la misma dimensión que  $u(t)$ .
- $B/F$  es una función de transferencia lineal que transforma  $w(t)$  como  $x(t) = (B/F)w(t)$ .
- $x(t)$ , una variable interna, es la salida del bloque lineal y tiene la misma dimensión que  $y(t)$ .
- $B$  y  $F$  son similares a los polinomios en un modelo lineal de error de salida.
- $h$  es una función no lineal que mapea la salida del bloque lineal  $x(t)$  a la salida del sistema  $y(t)$  como  $y(t) = h(x(t))$ .

Debido a que  $f$  actúa en el puerto de entrada del bloque lineal, esta función se denomina *no linealidad de entrada*. Del mismo modo, dado que  $h$  actúa en el puerto de salida del bloque lineal, esta función se denomina *no linealidad de salida*. Si su

sistema contiene varias entradas y salidas, debe definir las funciones  $f$  y  $h$  para cada señal de entrada y salida. No tiene que incluir tanto la entrada como la no linealidad de salida en la estructura del modelo. Cuando un modelo contiene solo la entrada de no linealidad  $f$ , se denomina modelo de *Hammerstein*. De manera similar, cuando el modelo contiene solo la no linealidad de salida  $h$ , se denomina modelo de *Wiener*.

El software calcula la salida del modelo Hammerstein-Wiener y en tres etapas:

- a. Calcula  $w(t) = f(u(t))$  a partir de los datos de entrada.

$w(t)$  es una entrada a la función de transferencia lineal  $B/F$ .

La no linealidad de entrada es una función estática (*sin memoria*), donde el valor de la salida en un momento  $t$  *determinado* depende solo del valor de entrada en el tiempo  $t$ .

- b. Calcula la salida del bloque lineal usando  $w(t)$  y las condiciones iniciales:

$$x(t) = (B/F)w(t).$$

Puede configurar el bloque lineal especificando los órdenes del numerador  $B$  y del denominador  $F$ .

- c. Calcula la salida del modelo transformando la salida del bloque lineal  $x(t)$  utilizando la función no lineal  $h$  como  $y(t) = h(x(t))$ .

Similar a la no linealidad de entrada, la no linealidad de salida es una función estática. Puede configurar la no linealidad de salida de la misma manera que la no linealidad de entrada. También puede eliminar la no linealidad de salida, de manera que  $y(t) = x(t)$ .

Los modelos resultantes son objetos **idnlhw** que almacenan todos los datos del modelo, incluidos los parámetros del modelo y los estimadores de no linealidad.

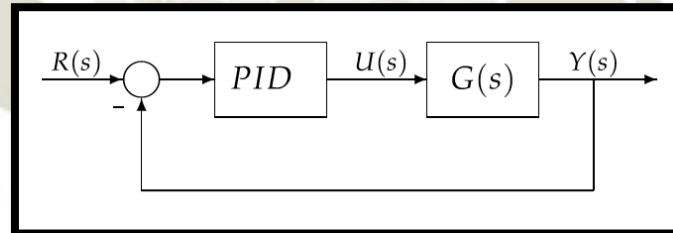
Puede estimar los modelos de Hammerstein-Wiener en la aplicación de Identificación del Sistema o en la línea de comandos usando el comando "**nlhw**".

Puede utilizar datos de entrada-salida de dominio de tiempo muestreados uniformemente para estimar modelos de Hammerstein-Wiener. Sus datos pueden tener uno o más canales de entrada y salida. No puede usar datos de series de tiempo (solo de salida) o datos de dominio de frecuencia para la estimación. Si tiene datos de series de tiempo, para ajustar un modelo no lineal, identifique los modelos ARX no lineales o los modelos de caja gris no lineales. (Mathworks. 2018)

### 2.4.5. Controladores PID

Los controladores tipo PID son los más utilizados en las industrias y en general para casi cualquier tipo de proceso; aun siendo robusto, existe un grupo de plantas inestables que no pueden ser estabilizadas por este tipo de controlador; pero nos viene bien para las aplicaciones de hidráulica en bucle cerrado.

Consideremos un lazo de control como se muestra en la figura:



**Figura 2.26.** Diagrama de bloques  
*Fuente: Métodos de sintonización PID*

Dentro de la familia de controladores PID, se incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID, veremos un resumen de cada uno de ellos:

- P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:  $u(t) = K_P * e(t)$ , que descripta desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p$$

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

- I: acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s}$$

La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- PI: acción de control proporcional-integral, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

, donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

- PD: acción de control proporcional-derivativa, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

- PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

### 2.4.6. Método clásico de sintonización de controladores PID

Para nosotros poder obtener un desempeño aceptable del sistema, tenemos que hallar o sintonizar los parámetros ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ) para poder obtener un sistema confiable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido.

Antes de abordar los distintos métodos de sintonización, daremos los tipos de funcionamiento que se presentan en un lazo de control realimentado, en el cual, teóricamente hay dos entradas, el Set Point y la perturbación y una sola salida (la realimentada).

#### Método de Oscilación o Método de respuesta en frecuencia

Siendo este método válido para plantas estables en lazo abierto, se realizan los siguientes pasos:

- a. Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que estas deben ser observadas en la salida del controlador.
- b. Registrar la ganancia crítica del controlador  $K_p = K_c$  y el período de oscilación de la salida del controlador,  $P_c$ .
- c. Ajustar los parámetros del controlador según la tabla:

**Tabla 1:** Parámetros de ajuste PID

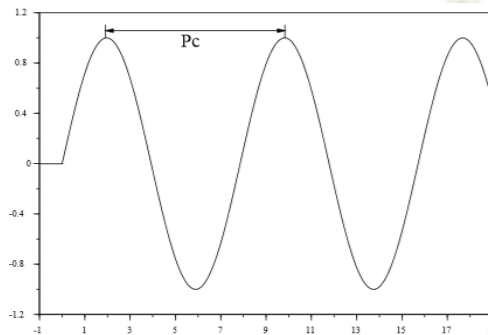
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_c$		
PI	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

**Fuente:** *Métodos de sintonización PID*

Dicha tabla fue obtenida por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1}, \text{ donde } v_0 > 0$$

Llevaremos la planta hasta que oscile como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.27.** Oscilación del sistema con el  $K_c$

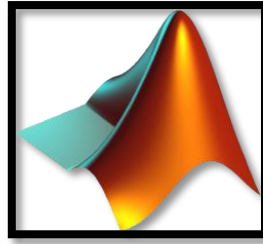
*Fuente: Métodos de sintonización PID*

Hay muchos casos en los que la sintonización mediante Ziegler-Nichols nos proporciona una respuesta no óptima, más bien con un gran sobreimpulso, lo que es inaceptable para algunas plantas; sin embargo, este método nos proporciona un punto de partida para una sintonía más fina.

## 2.5. Programas a emplear

### 2.5.1 MATLAB

MATLAB es una herramienta matemática utilizada a nivel mundial por su interfaz amigable ya que combina un entorno de escritorio para el análisis iterativo de datos con un lenguaje de programación que expresa problemas matemáticos, cuenta con interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas que emplean otro lenguaje de comunicación, además de contar con una gran variedad de herramientas.



**Figura 2.24.** MATLAB.

*Fuente:* (Wikipedia, MATLAB, 2018)

## 2.5.2 FluidSim H

FluidSIM es una herramienta de simulación para la obtención de los conocimientos básicos de la hidráulica y electrohidráulica. FluidSIM permite, por una parte, un esquema DIN justo de diagramas de circuitos fluidos; por otra parte, posibilita la ejecución – sobre la base de descripciones de componentes físicos – de una simulación plenamente explicativa. Con esto se establece una división entre la elaboración de un esquema y la simulación de un dispositivo práctico.



**Figura 2.25.** FluidSIM H

*Fuente:* <https://mechasource.blogspot.com/2018/03/blog-post.html>

## CAPITULO III

### 3. Diseño e implementación

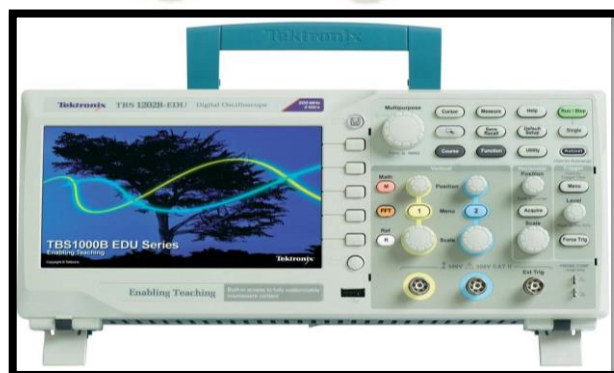
La parte del diseño será en lo concerniente al diseño de los parámetros del controlador, la implementación será referida al montaje y conexionado de los componentes en los perfiles ranurados. En esta tesis se realizará dos tipos de modelamiento, uno con el sistema sin carga y para el sistema acoplado a una masa que se comporta como una carga negativa de aproximadamente 90 N.

#### 3.1. Modelamiento del Sistema y Adquisición de Datos

##### 3.1.1. Generación y Adquisición

Antes de poder controlar un sistema, debemos conocer su comportamiento y su dinámica, adquirir data de forma precisa y eso es lo que se pretende en esta sección.

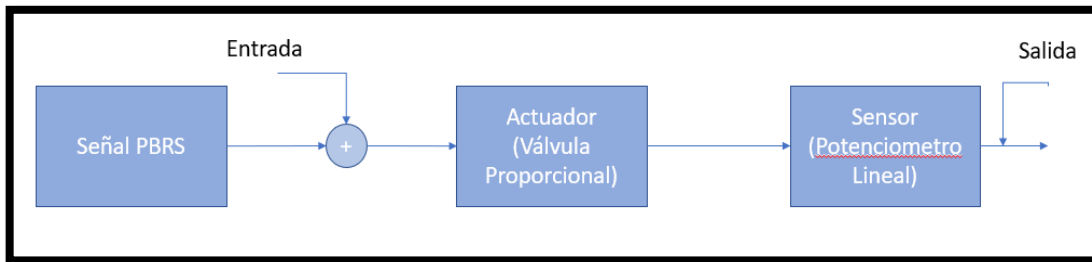
Para la adquisición de data usaremos el osciloscopio Tektronix que cuenta con una DAQ de 10 bits y su periodo de muestreo es de 0.004 segundos, este trae su propio software y también nos es posible la conexión a través de puerto USB, al tener estas características y al entregarnos la data en una hoja de cálculo; nos es más fácil poder programarlo al poder subirlo al software Matlab®



**Figura 3.1.** Osciloscopio Tektronix

*Fuente:* <https://www.tek.com>

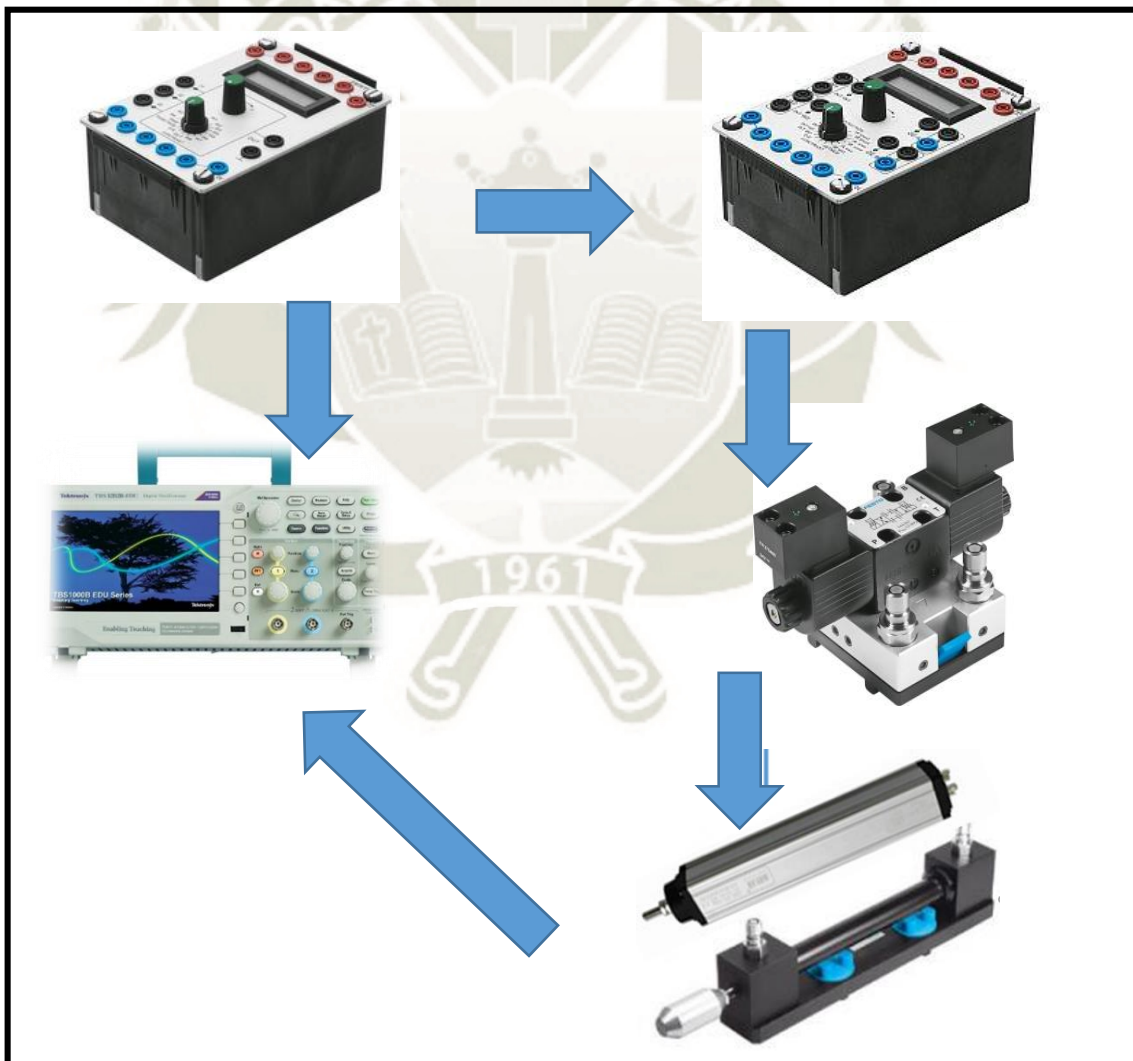
El método a emplear será el de Lazo Abierto, el cual consta en medir los datos de entrada y salida, sin que haya realimentación.



**Figura 3.2.** Sistema en lazo abierto como estrategia.

*Fuente: Elaboración Propia*

En la figura siguiente se muestra el esquema de como viajaran los datos.



**Figura 3.3.** Esquema de generación y adquisición de data

*Fuente: Elaboración Propia*

Explicando la figura 3.3, la señal se generará desde la Tarjeta Punto Consigna, esta irá por 2 caminos, al osciloscopio y al Amplificador Proporcional, del amplificador, pasará la señal en corriente hacia la válvula 4/3 proporcional y a su vez al cilindro hidráulico acoplado al potenciómetro lineal; este último cerrará el ciclo conectándose al osciloscopio nuevamente para poder ver el proceso en 2 canales y así poder adquirir en un Excel la data de entrada y salida.

El tiempo de muestreo (Sample Time), será dado por el osciloscopio, siempre tomando en cuenta el teorema de Nyquist, según el tiempo de muestreo al cual trabajará el sistema es de 0.004 segundos,

Como la señal que entrega el potenciómetro lineal es de 0 v a 10 v en sus posiciones finales y teniendo en cuenta que el actuador no debería llegar a estas posiciones máxima y mínima.

### **3.1.2. Señales de entrada y salida**

Ya que se requiere saber cómo es que funciona la planta, es necesario seleccionar un tipo de señal de entrada que nos permita ver el comportamiento lo más parecido posible a la realidad, es por eso que se descartan las señales impulso, pulso, etc., ya que este tipo de señales solo mostrarían la velocidad con la que sale o entra el cilindro.

El comportamiento de la planta hace que se tenga especial cuidado con los parámetros que se deberán tomar en cuenta para poder escoger el periodo de swicheo y la amplitud de la señal, hay que considerar el tiempo de respuesta de la válvula proporcional 4/3 que según el fabricante es 40 ms, la señal de entrada se da con una amplitud de +- 5 VDC, trabajando con una presión del sistema de 5 MPa.

Las señales de entrada que generará la Tarjeta Punto Consigna serán de tipo PRBS (señales pseudo aleatorias binarias) e irán en el rango de -5 a 5 volts, una

señal nula o de 0 volts significa que la válvula asume su posición media impidiendo el pase de aceite, ya que la válvula es de centro cerrado.

El rango de entrada del sistema es de -10 v a 10 v ya que ese es el rango al que trabaja el amplificador y por consiguiente la válvula proporcional, no se usará estos valores toques ya que debemos evitar que el sistema llegue a sus valores límites, por lo tanto, el valor inicial será 5 volts y valor final será -5 volts, la señal a utilizar será del tipo Pseudo-Random Binary Signal (PRBS), esta señal muestra un comportamiento similar a una secuencia aleatoria haciendo de cuenta que se trata de un 0 y un 1 binario, pero con valores de voltaje analógico, esta será generada por la tarjeta de Valor de consigna.

Las señales de salida que se generarán a gracias al potenciómetro lineal, serán de voltaje en un rango de 0 a 10 voltios, pero ya que la señal de entrada irá de -5 a 5 voltios, será necesario acondicionar la señal efectuando una “resta” de 5 volts a la señal de salida a la hora de la adquisición de datos.

### **3.1.3. Almacenamiento de datos**

Es vital poder almacenar datos para poder realizar el análisis, la hoja de cálculo que nos entregará el osciloscopio se ingresará en 3 variables, tiempo, entrada y salida.

Este tipo de osciloscopio trabaja como DAQ y nos entrega los datos muestreados de ambos canales en 2 hojas de cálculo separadas, en formato tiempo vs señal; aparte que nos da una captura de pantalla de ambos canales.

Para realizar la adquisición de datos, se fijaron los componentes hidráulicos en la plancha perfilada, y los componentes electrónicos en la parte superior.

### 3.1.4. Modelamiento

Hay diferentes métodos para poder llegar al modelamiento de sistemas, tenemos por ejemplo para sistemas LTI (lineales e invariantes en el tiempo), se puede conocer el modelo con ecuaciones diferenciales, que a su vez se convertirán en funciones de transferencia, para poder aplicar un mejor control.

Y en el caso nuestro para sistemas no-lineales, hay diferentes métodos computacionales que se pueden aplicar debido a que, al ser muy complejos, sería una tarea muy tediosa el poder tratar de describir su comportamiento debido al gran número de variables que contendría.

Para este caso usaremos la herramienta de identificación de sistemas del software Matlab ya que es un software que conocemos y es esencial en el desarrollo de todos los ingenieros de ramas afines.

### 3.1.5. Zona Muerta

Teniendo en cuenta que el sistema presenta estas no linealidades se procede a realizar una identificación no lineal tomando en cuenta como principal fuente de no linealidad la zona muerta la cual se determina realizando pruebas en el sistema usando como entrada una rampa y determinando a que nivel de voltaje la planta responde.

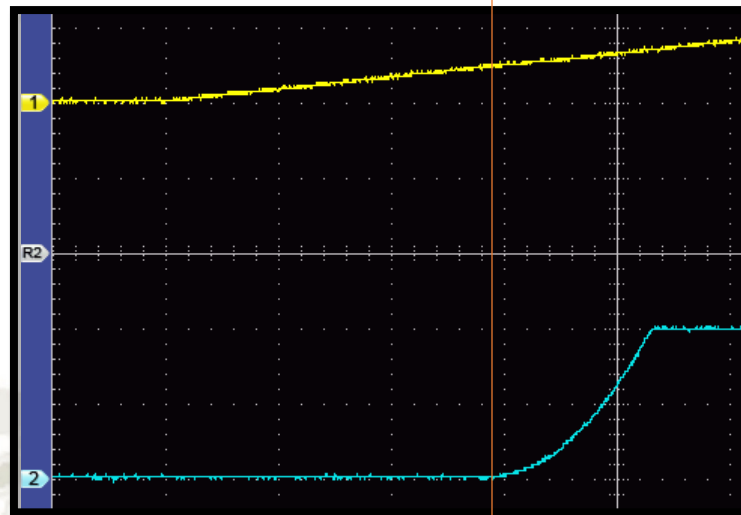
Las pruebas realizadas a continuación se realizaron con la Tarjeta de Punto de Consigna ya que nos permite generar rampas, tanto positivas como negativas y poder ajustar el valor de la pendiente para una mejor observación; estas pruebas se realizaron con el cilindro en posición vertical con el peso sujetado en el extremo final del vástago.

Se generó una rampa de 0 a 5 voltios con pendiente de 3seg/volt para poder determinar exactamente el voltaje a la que el pistón comienza a desplazarse desde su posición más retraída.

**Tabla 2.** Muestra de datos de la rampa de voltaje vs desplazamiento de pistón

TIEMPO (seg)	RAMPA (V)	SALIDA (V)
9.85	2.4	0.2
9.86	2.4	0.2
9.87	2.4	0.2
9.88	2.4	0.2
9.89	2.4	0.2
9.9	2.6	0.2
9.91	2.6	0.2
9.92	2.6	0.2
9.93	2.6	0.2
9.94	2.6	0.2
9.95	2.6	0.2
9.96	2.6	0.2
9.97	2.6	0.2
9.98	2.6	0.4
9.99	2.6	0.4
10	2.6	0.4
10.01	2.6	0.4
10.02	2.6	0.4
10.03	2.6	0.4
10.04	2.6	0.4
10.05	2.6	0.4
10.06	2.6	0.4
10.07	2.6	0.4
10.08	2.6	0.4
10.09	2.8	0.4
10.1	2.8	0.4
10.11	2.6	0.4
10.12	2.6	0.4
10.13	2.6	0.4
10.14	2.6	0.4
10.15	2.6	0.4
10.16	2.6	0.4
10.17	2.6	0.4
10.18	2.6	0.4
10.19	2.6	0.4
10.2	2.6	0.4
10.21	2.8	0.4
10.22	2.6	0.4
10.23	2.6	0.4

*Fuente: Elaboración Propia*



**Figura 3.4.** Rampa ascendente vs desplazamiento del pistón  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se observó en la anterior figura, el cilindro comienza a extenderse a partir de los 2.4 VDC, como sabemos, la zona muerta no es la única fuente de no-linealidad, pero es la más importante.

Se llevará a cabo la misma prueba para observar el retraimiento del cilindro cuando este se encuentra en su posición más extendida.

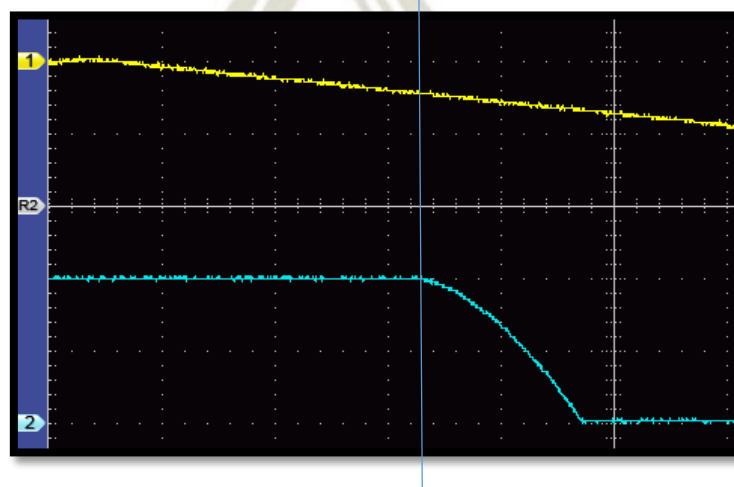
**Tabla 3.** Rampa de voltaje vs pistón extendido

TIEMPO (seg)	RAMPA (V)	
	RAMPA (V)	SALIDA (V)
8.44	-2.2	10
8.45	-2.2	10
8.46	-2.2	10
8.47	-2.2	10
8.48	-2.2	10
8.49	-2.2	9.8
8.5	-2.2	9.8
8.51	-2.2	9.8
8.52	-2.2	9.8
8.53	-2.4	9.8
8.54	-2.4	9.8
8.55	-2.4	9.8
8.56	-2.4	9.8
8.57	-2.4	9.8
8.58	-2.4	9.8
8.59	-2.4	9.8
8.6	-2.4	9.8

8.61	-2.4	9.8
8.62	-2.4	9.8
8.63	-2.4	9.6
8.64	-2.4	9.6
8.65	-2.4	9.6
8.66	-2.4	9.6
8.67	-2.4	9.6
8.68	-2.4	9.6
8.69	-2.4	9.6
8.7	-2.4	9.6
8.71	-2.4	9.6
8.72	-2.4	9.4
8.73	-2.4	9.6
8.74	-2.4	9.6
8.75	-2.4	9.4
8.76	-2.4	9.4
8.77	-2.4	9.4
8.78	-2.4	9.4
8.79	-2.4	9.4
8.8	-2.4	9.4
8.81	-2.4	9.4
8.82	-2.4	9.4
8.83	-2.4	9.4
8.84	-2.4	9.4
8.85	-2.4	9.2

*Fuente: Elaboración Propia*

Como se ve en la siguiente figura, se aplico una rampa de voltaje negativa desde 0 a -5 VDC para observar a que voltaje comenzaba a retraerse el pistón desde su posición más extendida



**Figura 3.5.** Rampa negativa vs retraimiento del pistón

*Fuente: Elaboración Propia*

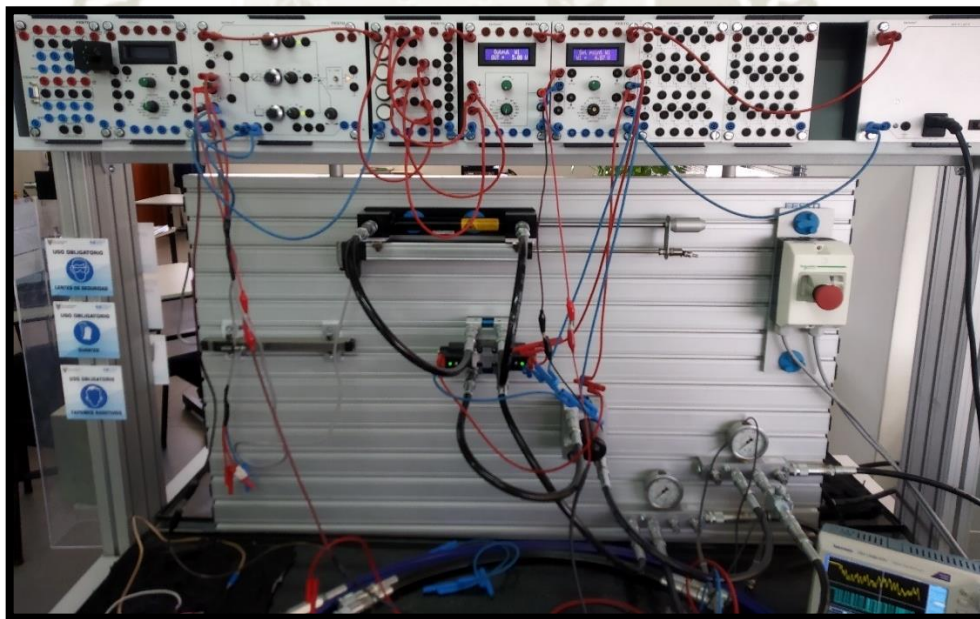
Las pruebas anteriores se realizaron para el cilindro acoplado a la masa de 9 kg.

Las pruebas para el cilindro sin masa no fueron documentadas, pero doy fe de que los valores de zona muerta para que el cilindro empiece a extenderse es 2.2 volts y para que se retraiga ya estando completamente extendido es de 3.2 volts.

	Al extenderse	Al retraerse
Cilindro sin carga	2.2 volts	3.2 volts
Cilindro con carga	2.4 volts	2.4 volts

### 3.1.6. Sistema sin carga

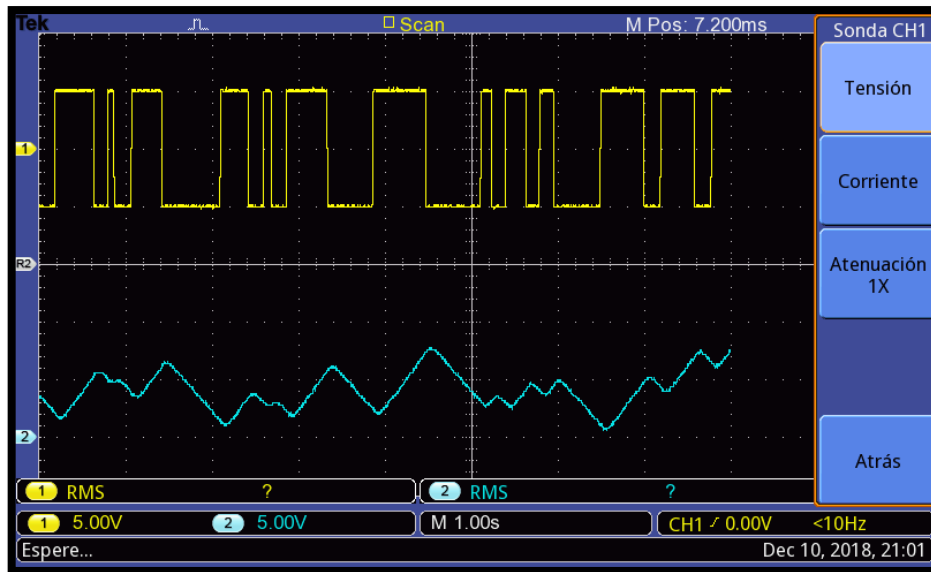
Para realizar el modelamiento de este sistema se fijaron los componentes en el perfil ranurado y se usó un cilindro en posición horizontal, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.6.** Armado de componentes en el módulo didáctico

*Fuente: Elaboración Propia*

Como se ve en la siguiente figura, se tomaron datos en el osciloscopio los datos de entrada y salida, mismos que fueron muestreados por el osciloscopio.



**Figura 3.7.** Señal seudo binaria aleatoria (CH1) y salida del sistema (CH2)

*Fuente: Elaboración Propia*

Como se mencionó anteriormente, este osciloscopio trae incorporado un DAQ, que nos exporta los datos a un excel, para poder usarlos más fácilmente, cabe resaltar que se tuvo que escalar la señal de salida: de 0 a 10 hacia -5 a 5 voltios.

TIEMPO	U1	Y1	Y1 ESCALADA
0	-5	3.4	-1.6
0.004	-5	3.6	-1.4
0.008	-4.8	3.6	-1.4
0.012	-5	3.6	-1.4
0.016	-5	3.6	-1.4
0.02	-5	3.4	-1.6
0.024	-5	3.4	-1.6
0.028	-5	3.4	-1.6
0.032	-5	3.4	-1.6
0.036	-4.8	3.4	-1.6
0.04	-5	3.4	-1.6
0.044	-5	3.2	-1.8
0.048	-5	3.4	-1.6
0.052	-5	3.2	-1.8
0.056	-5	3.2	-1.8
0.06	-5	3.2	-1.8
0.064	-5	3	-2
0.068	-5	3	-2
0.072	-5	3.2	-1.8
0.076	-5	3	-2
0.08	-5	3	-2
0.084	-5	3	-2
0.088	-5	3	-2
0.092	-5	2.8	-2.2
0.096	-5	2.8	-2.2
0.1	-5	2.8	-2.2
0.104	-5	2.6	-2.4

**Tabla 4.** Data adquirida por el osciloscopio mostrada en una hoja de cálculo

*Fuente: Elaboración Propia*

En el software Matlab se introdujo la data correspondiente a ambas señales bajo el nombre de las variables: “u1” y “y1”, entrada y salida respectivamente.

Se tomará una porción de la muestra para realizar el análisis, ya que debemos descartar las señales erráticas.

```
Command Window
>> u1=[]
u1 =
     []
>> y1=[]
y1 =
     []
```

**Figura 3.8.** Vectores “u1” y “y1”

*Fuente: Elaboración Propia*

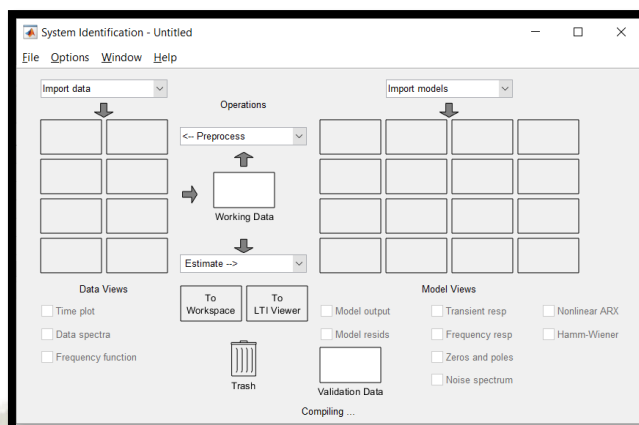
Los datos se meten a través de vectores como se ve en la figura siguiente:

	1	2
1	-1.6000	
2	-1.4000	
3	-1.4000	
4	-1.4000	
5	-1.4000	
6	-1.6000	
7	-1.6000	
8	-1.6000	
9	-1.6000	
10	-1.6000	
11	-1.6000	
12	-1.8000	

**Figura 3.9.** Datos importados al workspace de Matlab

*Fuente: Elaboración Propia*

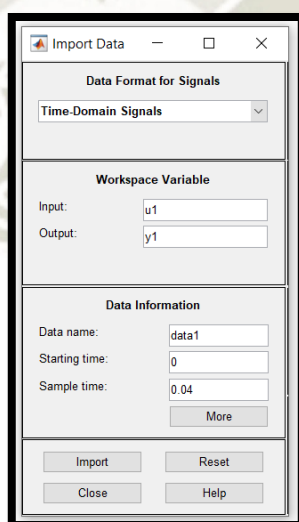
Matlab cuenta con una herramienta poderosa para la identificación de sistemas, accedemos a ella tecleamos el comando “ident” y nos aparece la ventana principal de la herramienta “System Identification”, como se ve en la siguiente figura.



**Figura 3.10.** Ventana principal System Identification Tool

*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez abierta la herramienta, procedemos a importar los datos que se encuentran ya en el workspace, seleccionando la ventana despegable “Import Data”, escogeremos “Time-Domain Signals”, ya que la adquisición la hicimos tomando en cuenta el tiempo de muestreo, mas no la frecuencia; para “input” ingresaremos u1, para output, y1; podemos escoger un nombre para guardar el proyecto, el tiempo de inicio “Starting Time” lo cambiamos a 0 y en el “Sample Time” ingresamos 0.004 segundos.

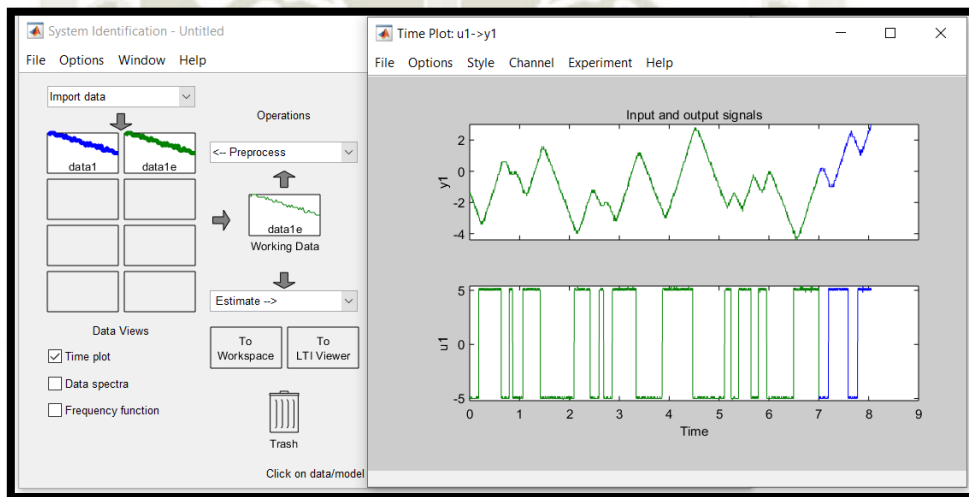


**Figura 3.11.** Importación de datos con System Identification Tool

*Fuente: Elaboración Propia*

Ya importada la data, podemos pre-procesar la señal en la desplegable “Preprocess”, en la que podemos escoger un rango dentro de los datos importados, en este caso, la señal completa se muestra en azul, está tapada por la señal recordada de color verde, y la señal recortada se guarda bajo el nombre de “data1e”, se recortó la señal ya que la salida llegó a la zona de saturación, cosa que no permitiría realizar una buena estimación.

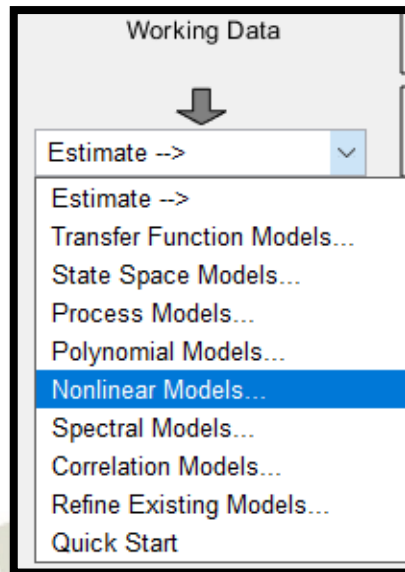
Como se muestra en la siguiente figura, haciendo un click en el checkbox “Time plot”, nos mostrara un grafico de ambas señales, entrada y salida.



**Figura 3.12.** Ploteado de señales de entrada y salida

*Fuente: Elaboración Propia*

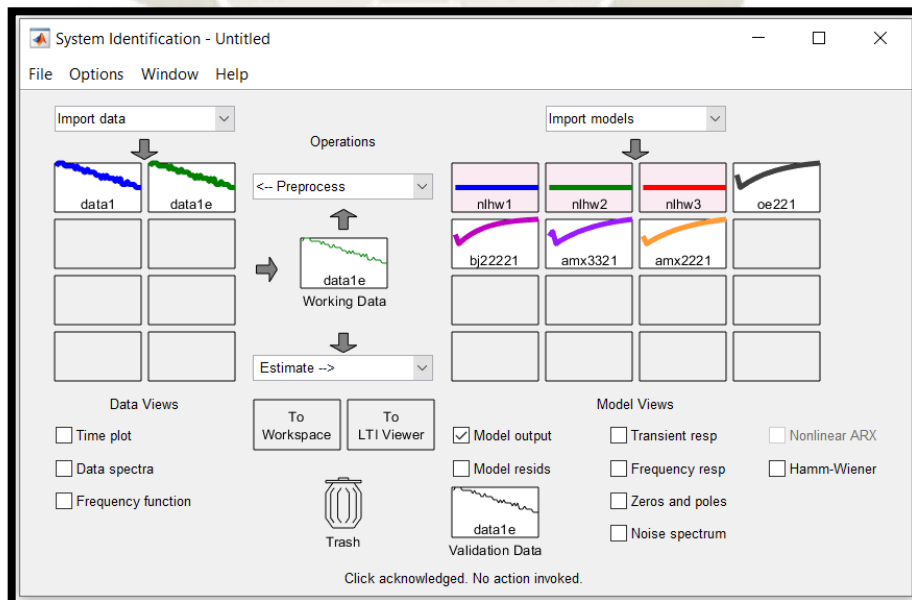
Una vez seleccionando el rango de data a procesar, el siguiente paso es la estimación del modelo; desplegaremos la opción “Estimate”, donde podemos escoger a que tipo de modelo queremos que se asemeje nuestro sistema, de acuerdo a si es o no lineal; para modelos lineales se recomienda “Polynomial Models” y para modelos no lineales como en nuestro caso se usará “Nonlinear Models”



**Figura 3.13.** Opciones de estimación de modelos

*Fuente: Elaboración Propia*

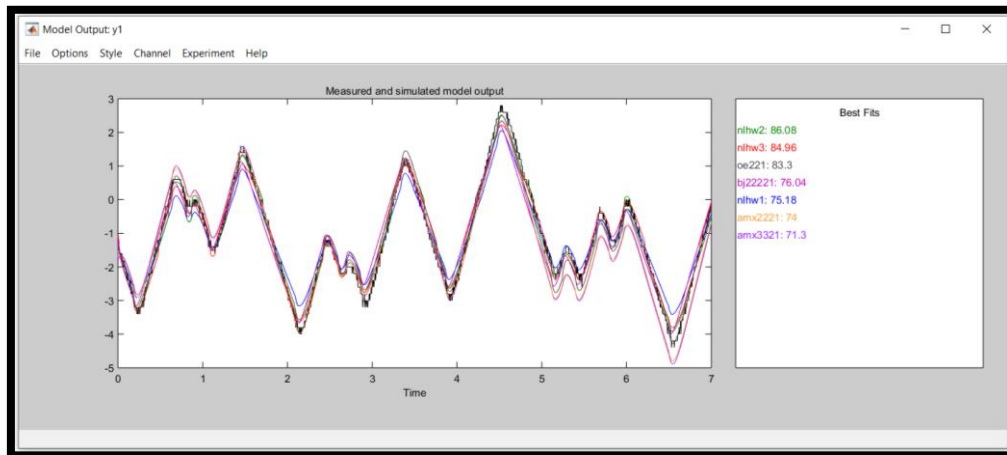
Aún sabiendo que nuestro sistema es no-lineal, probaremos haciendo aproximaciones lineales, para comprobar, como se verá posteriormente que haciendo estimaciones no-lineales con el modelo Hammerstein-Wiener, obtendremos mejores resultados.



**Figura 3.14.** Opciones de estimación de modelos

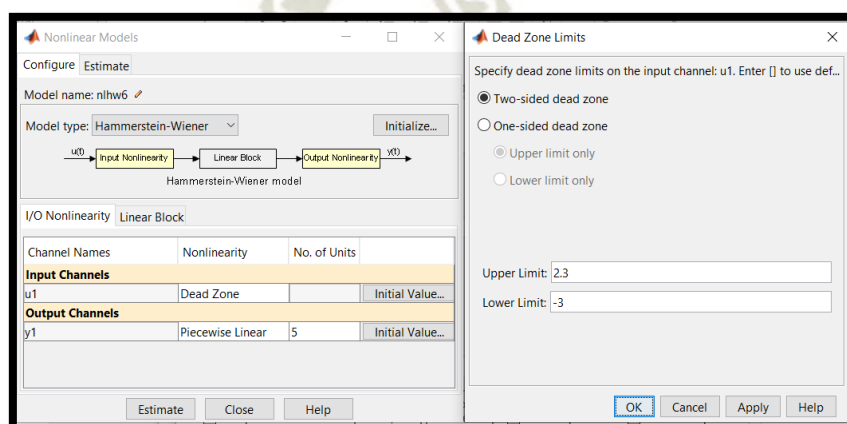
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se ve en la siguiente figura, se probó con bastantes tipos de modelos, polinomiales y no-lineales, y se observa que los no-lineales calzan mejor.



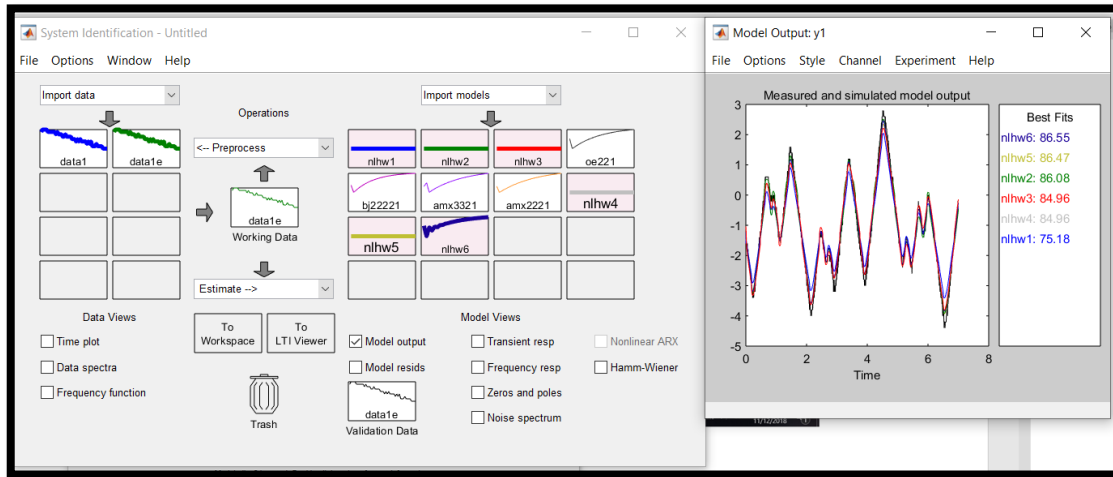
**Figura 3.15.** Best Fits de modelos estimados  
*Fuente: Elaboración Propia*

En la ventana siguiente, podemos configurar los parámetros del modelo Hammerstein-Wiener, para la entrada del sistema, escogemos la “no-linealidad” correspondiente a la zona muerta de la válvula proporcional, que haciendo pruebas nos da: 2.3 voltios para que el cilindro comience a extenderse y -3 voltios para que el cilindro comience a retraerse; para la parte de Salida, escogeremos la opción “Piecewise Linear”, esto quiere decir que la salida la dividirá en 5 trozos lineales, para realizar la estimación del modelo.



**Figura 3.16.** Configuración de parámetros modelo Hammerstein-Wiener  
*Fuente: Elaboración Propia*

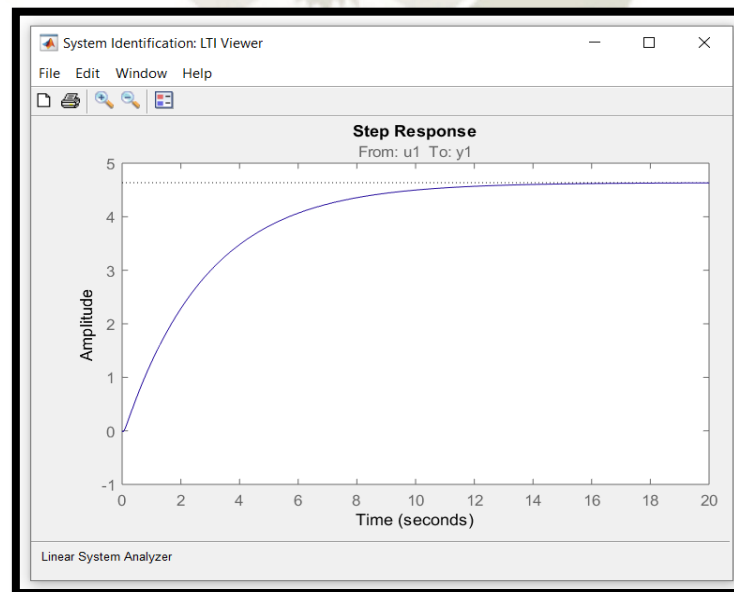
En la siguiente figura, podemos corroborar que los parámetros escogidos son los que más se asemejan a la planta real, entonces procedemos a escoger el modelo “nlhw6” ya que su aproximación llega al 86.55%.



**Figura 3.17.** Escogemos mejores aproximaciones

*Fuente: Elaboración Propia*

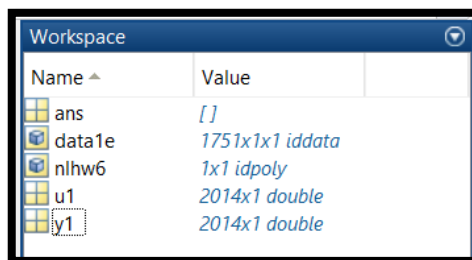
Una vez escogido este modelo, procedemos a arrastrarlo al pequeño recuadro que se llama “LTI Viewer”, para corroborar, al linealizarlo y aplicarle una entrada escalón, este nos muestre una curva aceptable, como se ve en la figura siguiente.



**Figura 3.18.** Respuesta del sistema con la función LTI Viewer.

*Fuente: Elaboración Propia*

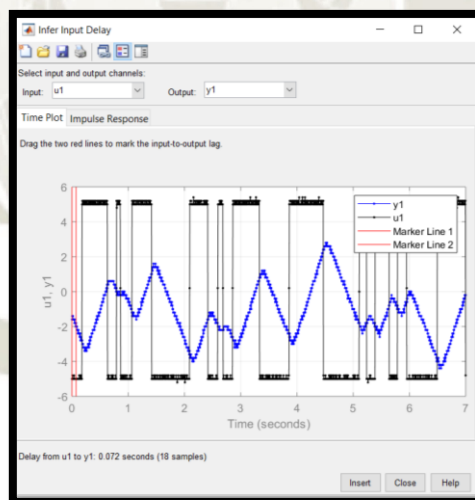
También se procede a exportar “data1e” que es el sistema contra el que se validó la aproximación “nlhw6”, todo al workspace.



**Figura 3.19.** Variables en el workspace

*Fuente: Elaboración Propia*

Como se propuso en el presente documento, era necesario que el rango de voltaje de la entrada y la salida fuera el mismo, ya que sino, como se verá más adelante, el sistema H-W, al linealizarlo, se vuelve totalmente inestable



**Figura 3.20.** Señales u1 y y1

*Fuente: Elaboración Propia*

Al tener ya los sistemas en el Workspace, entonces podemos comenzar a trabajarlas, para esto introducimos los siguientes comandos:

```
>> linealModel=linapp(nlhw6,data1e)
```

```
>> G=tf(d2c(linealModel))
```

En la siguiente figura se muestran los comandos en matlab para linealizar y sacar la función de transferencia del sistema en Laplace.

```
>> linealModel=linapp(nlhw6,datale)

linealModel =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
  B(z) = -0.007658 z^-1 + 0.00859 z^-2

  F(z) = 1 - 1.029 z^-1 - 0.7976 z^-2 + 0.8267 z^-3

Name: nlhw6
Sample time: 0.004 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: nb=2 nf=3 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

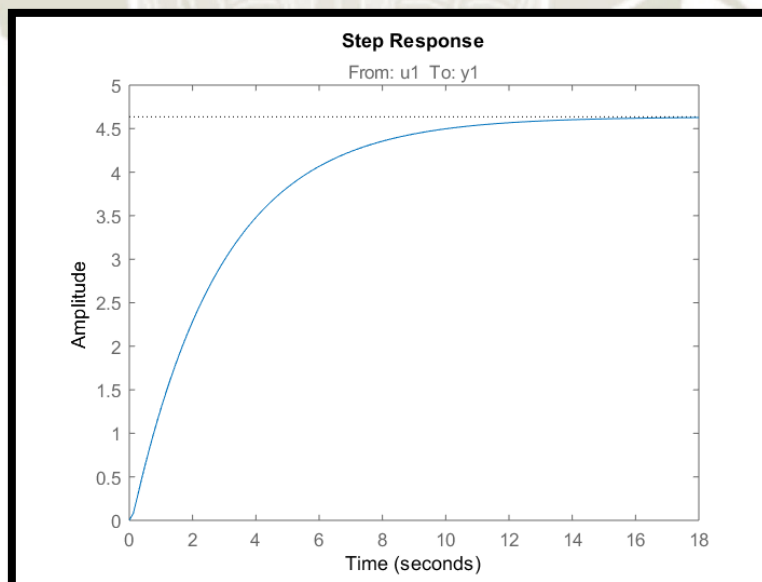
Status:
Model modified after estimation.
>> G=tf(d2c(linealModel))

G =

From input "u1" to output "y1":
  -1.072 s^3 - 1333 s^2 - 6.5e05 s + 1.974e07
-----
  s^4 + 75.35 s^3 + 6.187e05 s^2 + 1.223e07 s + 4.259e06
Continuous-time transfer function.
```

**Figura 3.21.** Obtención de la función de transferencia a partir del modelo no-lineal  
*Fuente: Elaboración Propia*

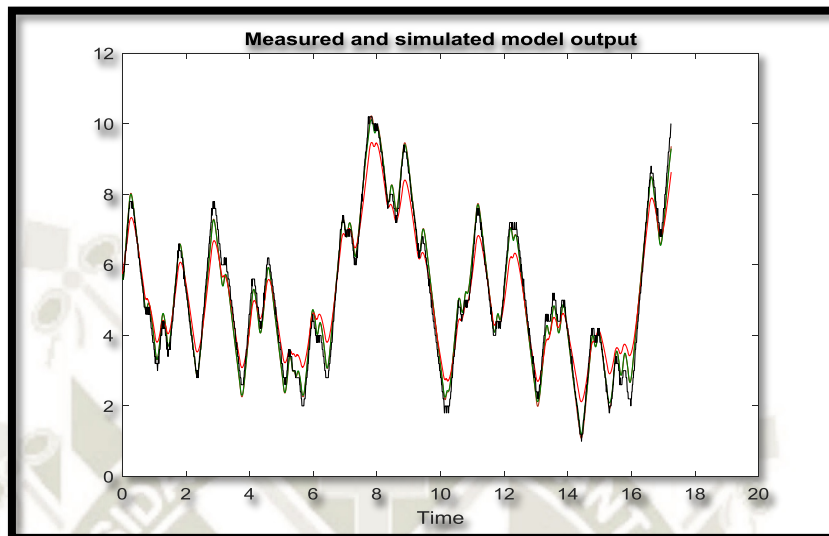
Aplicando un escalón unitario al sistema, se tiene la siguiente respuesta:



**Figura 3.22.** Escalón unitario aplicado a la planta modelada “G” en lazo abierto  
*Fuente: Elaboración Propia*

### Observación importante acerca de los modelos aproximados

Se obtuvo un resultado adverso, a pesar de presentar una gran similitud al modelo, al hacerle todo el procedimiento anterior, el resultado que nos da es que el sistema es inestable.



**Figura 3.23.** Best Fits de un modelado anterior

*Fuente: Elaboración Propia*

```
>> lm= linapp(nlhw1,mydata)

lm =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
  B(z) = -0.0147 z^-1 + 0.01426 z^-2

  F(z) = 1 - 2.592 z^-1 + 2.327 z^-2 - 0.735 z^-3

Name: nlhw1
Sample time: 0.01 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: nb=2 nf=3 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Model modified after estimation.
>> G1=tf(d2c(lm))

G1 =

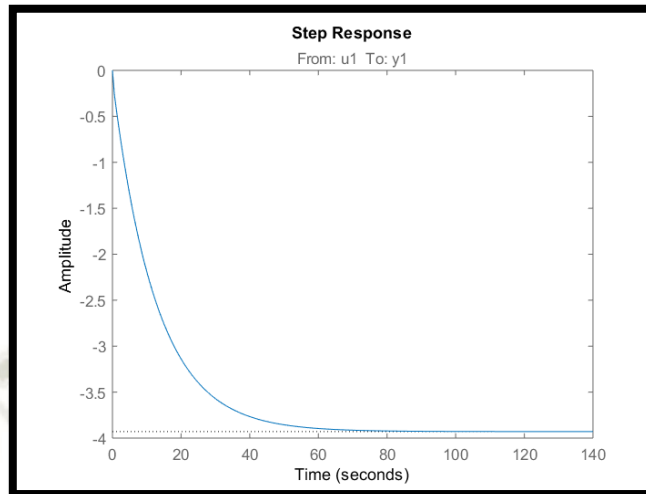
From input "u1" to output "y1":
  -0.8244 s^2 - 173.1 s - 522
  -----
  s^3 + 30.79 s^2 + 1685 s + 132.8
```

**Figura 3.24.** Función de transferencia de un modelado anterior

*Fuente: Elaboración Propia*

Vemos que todos los ceros nos salen negativos, el sistema es inestable y por lo tanto se hizo mal la adquisición de datos; **esto se debe a que acotamos mal el rango de muestras o a que la entrada no está en el mismo rango que la salida.**

Aplicando un escalón unitario.



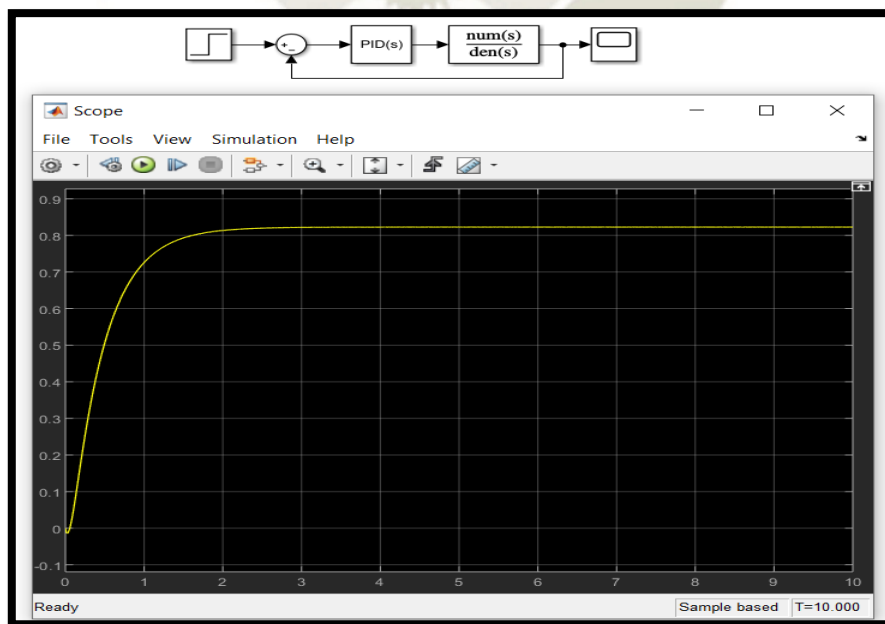
**Figura 3.25.** Respuesta inestable de la planta “G”

*Fuente: Elaboración Propia*

Retomando el desarrollo, seguimos el proceso, hallando el lugar de raíces del sistema estimado las hallamos mediante el siguiente código:

```
clear all, close all, clc
num=[-1.072 -1333 -650000 19740000];
den=[1 75.35 618700 12230000 4259000]
G=tf(num,den)
```

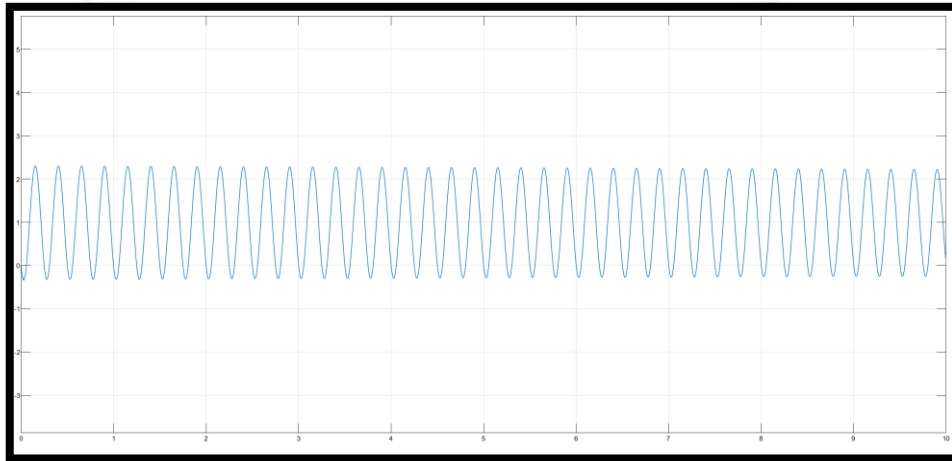
Entonces aplicando la estrategia de Ziegler Nichols:



**Figura 3.26.** Respuesta del sistema en lazo cerrado

*Fuente: Elaboración Propia*

Aplicando el método de Ziegler-Nichols, llevamos el sistema hasta que tenga oscilaciones constantes aumentando la constante proporcional  $K_p=18.75$ ; entonces este valor se convertirá en nuestro  $K_c$  (crítico), del mismo grafico sacamos los ciclos por segundo que son 4, entonces  $P_c=0.25$

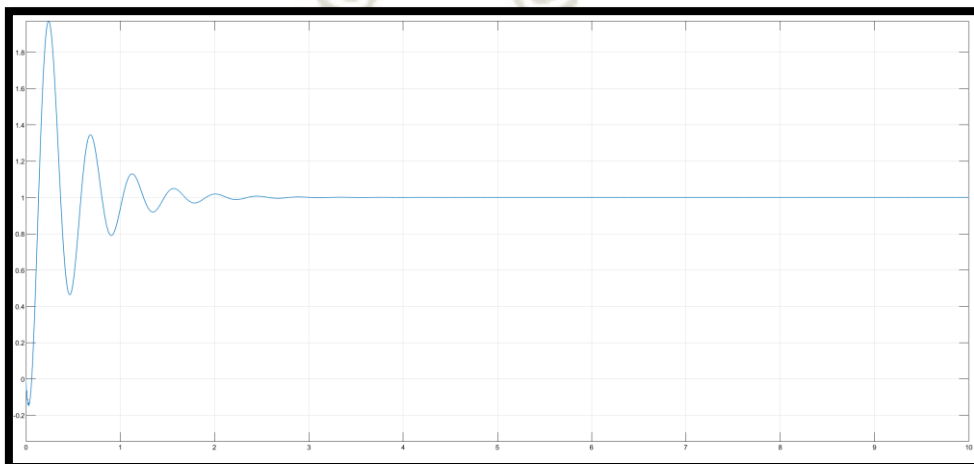


**Figura 3.27.** Oscilaciones del sistema al aplicar el  $K_c$   
*Fuente: Elaboración Propia*

Aplicando Z-N para implementar un Controlador PI

$$K_p = 8.44; Tr = 0.2083;$$

$$K_i = \frac{K_p}{Tr}; \quad K_i = 42.2$$



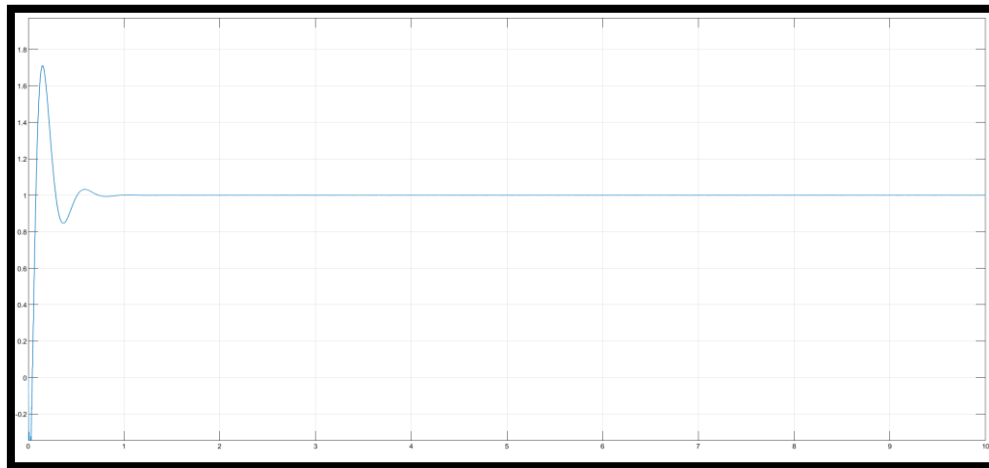
**Figura 3.28.** Respuesta con controlador PI

*Fuente: Elaboración Propia*

Aplicando Z-N para implementar un Controlador PID

$$K_p = 11.25 \quad T_r = 0.125 \quad K_i = 11.25/0.125 = 90$$

$$T_d = 0.03125 \quad K_d = 11.25 \times 0.03125 = 0.3515$$

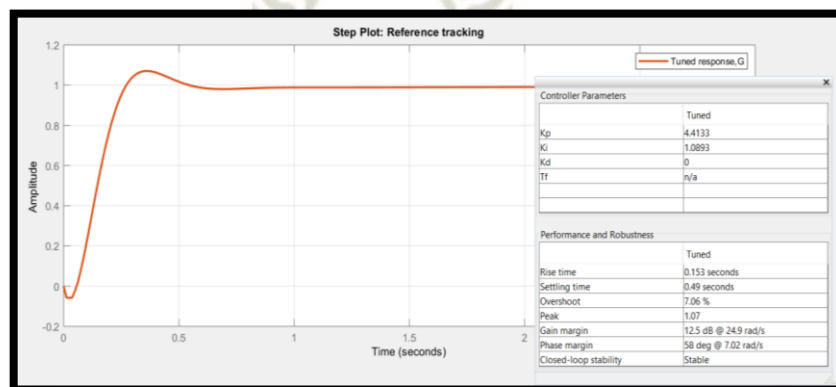


**Figura 3.29.** Respuesta con controlador PID

*Fuente: Elaboración Propia*

### Validación del sistema

Para la comprobar la sintonización de parámetros podemos utilizar la herramienta PIDTuner; como vemos la sintonización propuesta por Ziegler-Nichols no es un método infalible, pero lo podemos usar como punto de partida para una sintonización más fina en base a la experiencia del usuario.



**Figura 3.30.** Respuesta de la planta “G” ya con controlador PI

*Fuente: Elaboración Propia*

La respuesta dada por el PIDTuner es  $K_p=4.41$  y  $K_i= 1.09$

### 3.1.7. Sistema con carga

Para que tenga utilidad el control del sistema, se simulará como un trabajo, el estar moviendo una masa de aluminio de 9 kg como se ve en la siguiente figura.

Se cambió el extremo final del vástago, para poder así sujetar la masa de aluminio, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.31.** Reemplazo del extremo final del vástago  
*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez hecho esto se procede con el montaje como se ve en la figura, el fabricante recomienda que la masa se “jale”, con el cilindro colocado en posición vertical en los perfiles acanalados de este tipo; en vez de que se “levante”, ósea la masa por encima del cilindro.

Al aumentar la inercia del sistema, y por efecto de la gravedad, la masa tiende a jalar al pistón y es por eso que la señal de corrección será constante para tratar de corregir este efecto.

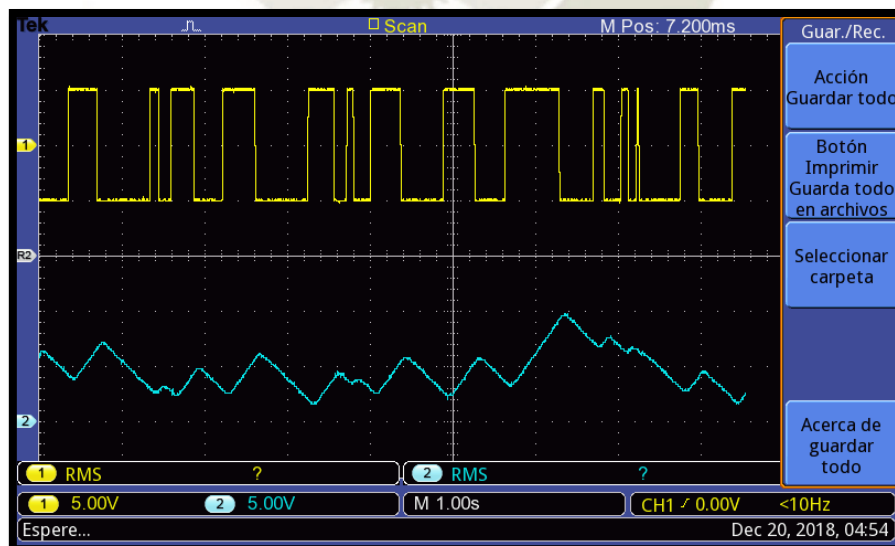
Como se muestra en la siguiente figura, se hizo el siguiente montaje en los perfiles acanalados de los costados del módulo.



**Figura 3.32.** Cilindro acoplado con la masa de aluminio.

*Fuente: Elaboración Propia*

Para la adquisición de datos usaremos el mismo método del lazo abierto, a continuación, se presentan los datos adquiridos.



**Figura 3.33.** Respuesta del sistema a lazo abierto

*Fuente: Elaboración Propia*

Se realizó el suavizado de la curva de respuesta del sensor para poder tener resultados más precisos al introducir la data en el “System Identification Tool”, para esto se usó el método “Moving Average” en el Excel.

**Tabla 5.** Datos de entrada y salida escalada y suavizada

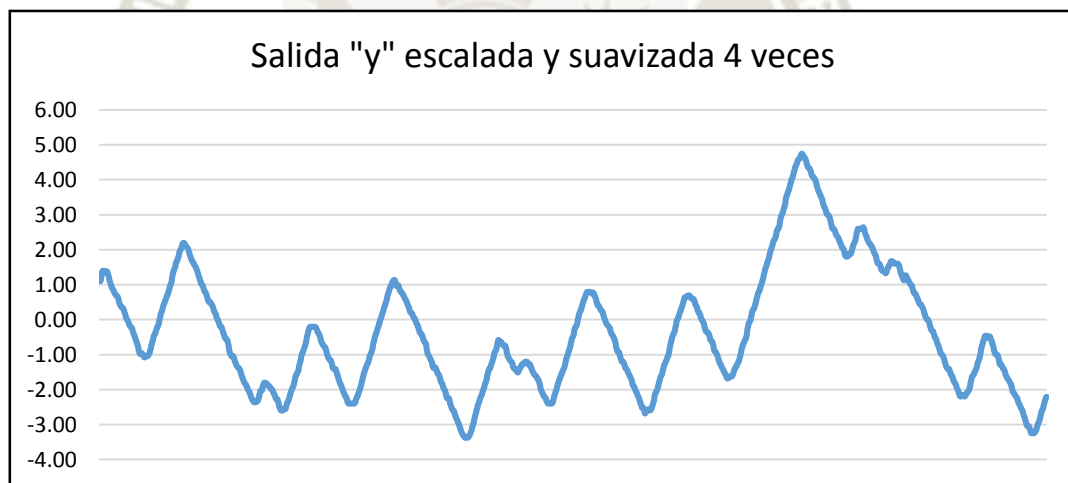
Entrada u	Salida y	Salida y escalada	Suavizado 1	Suavizado 2	Suavizado 3	Suavizado 4
-5.00	6.20	1.20	1.07	1.11	1.12	1.14
-5.00	6.20	1.20	1.27	1.22	1.22	1.22
-5.00	6.40	1.40	1.33	1.33	1.31	1.30
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.38	1.37	1.36
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.38	1.38	1.38
-5.00	6.40	1.40	1.33	1.36	1.36	1.36
-5.00	6.20	1.20	1.33	1.33	1.35	1.35
-5.00	6.40	1.40	1.33	1.36	1.36	1.36
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.38	1.38	1.38
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39
-5.00	6.40	1.40	1.40	1.38	1.37	1.36
-5.00	6.40	1.40	1.33	1.33	1.33	1.32
-5.00	6.20	1.20	1.27	1.27	1.27	1.27
-5.00	6.20	1.20	1.20	1.22	1.22	1.22
-5.00	6.20	1.20	1.20	1.18	1.18	1.18
-5.00	6.20	1.20	1.13	1.13	1.13	1.13
-5.00	6.00	1.00	1.07	1.07	1.07	1.07
-5.00	6.00	1.00	1.00	1.02	1.02	1.03
-5.00	6.00	1.00	1.00	0.98	0.99	0.99
-5.00	6.00	1.00	0.93	0.96	0.95	0.95
-5.00	5.80	0.80	0.93	0.91	0.92	0.92
-5.00	6.00	1.00	0.87	0.89	0.89	0.89
-5.00	5.80	0.80	0.87	0.87	0.87	0.87
-5.00	5.80	0.80	0.87	0.87	0.86	0.86
-5.00	6.00	1.00	0.87	0.84	0.84	0.83
-5.00	5.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
-5.00	5.60	0.60	0.73	0.76	0.76	0.77
-5.00	5.80	0.80	0.73	0.73	0.74	0.74
-5.00	5.80	0.80	0.73	0.73	0.73	0.73

*Fuente:* Elaboración propia



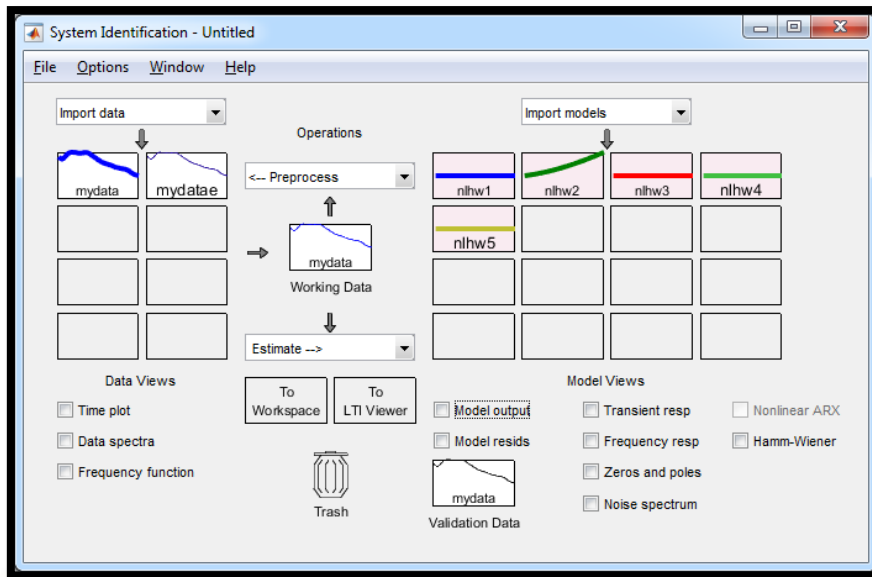
**Figura 3.34.** Datos del sistema sin tratamiento  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se observa, la curva que describe el sistema se ve más clara y representa mejor el comportamiento real del sistema.



**Figura 3.35.** Datos del sistema suavizados  
*Fuente: Elaboración Propia*

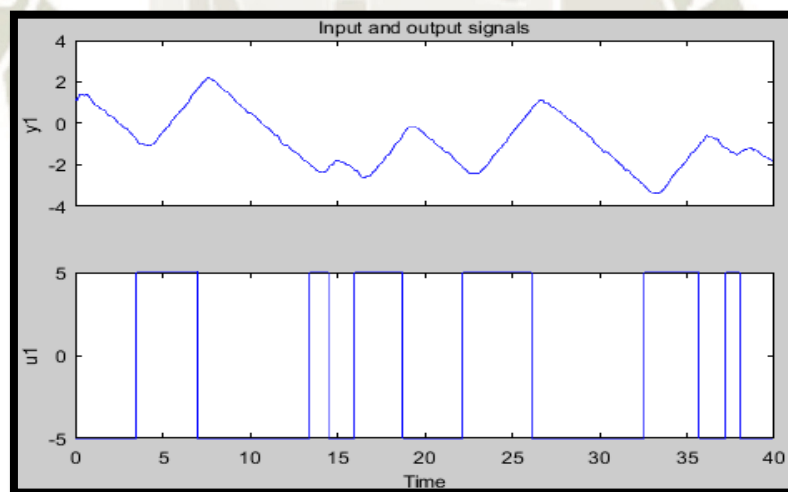
Una vez tenemos los datos preprocesados, entonces podemos hacer una mejor estimación del modelo del sistema a través de la herramienta System Identification.



**Figura 3.36.** Estimaciones hechas sobre “mydata”

*Fuente: Elaboración Propia*

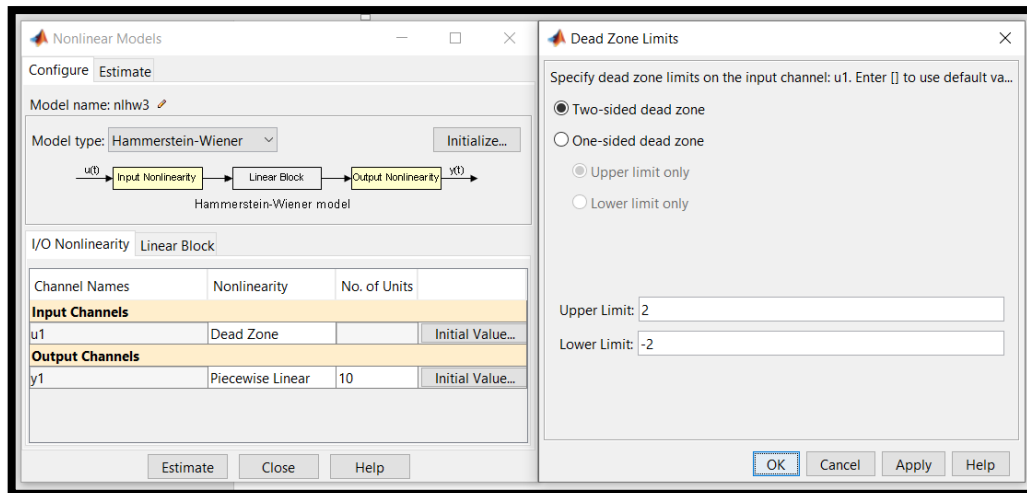
Como se ve en la figura siguiente, las gráficas que generan los datos muestreados se ven con más claridad una vez que ya fueron preprocesados.



**Figura 3.37.** Datos de entrada u1 y salida u2 muestreados

*Fuente: Elaboración Propia*

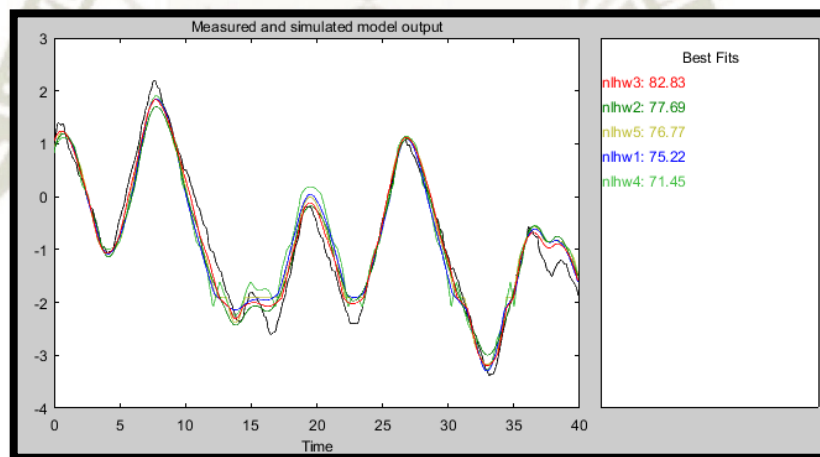
Entonces una vez hechas las aproximaciones correspondientes, vemos que la mejor es la nlhw3, ya que se introdujeron los datos de límites de zona muerta de 2 V y -2 V, y la parte lineal se dividió en 10 partes.



**Figura 3.38.** Parámetros del Modelo Hammerstein-Wiener.

*Fuente: Elaboración Propia*

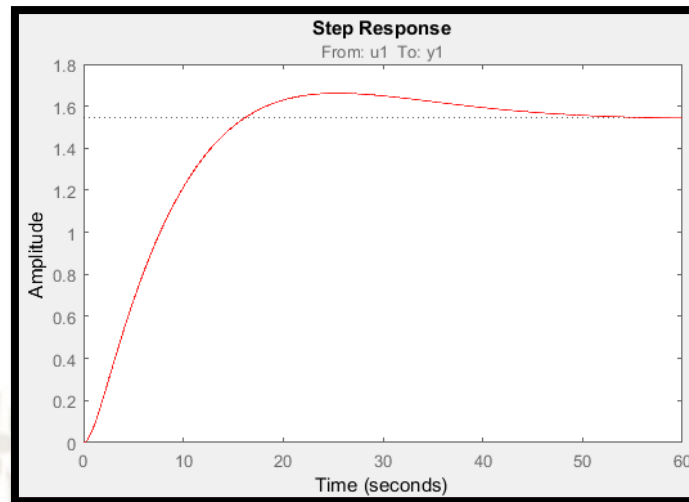
En la siguiente imagen se ven los Best Fits de los modelos aproximados:



**Figura 3.39.** Best fits o mejores aproximaciones al modelo

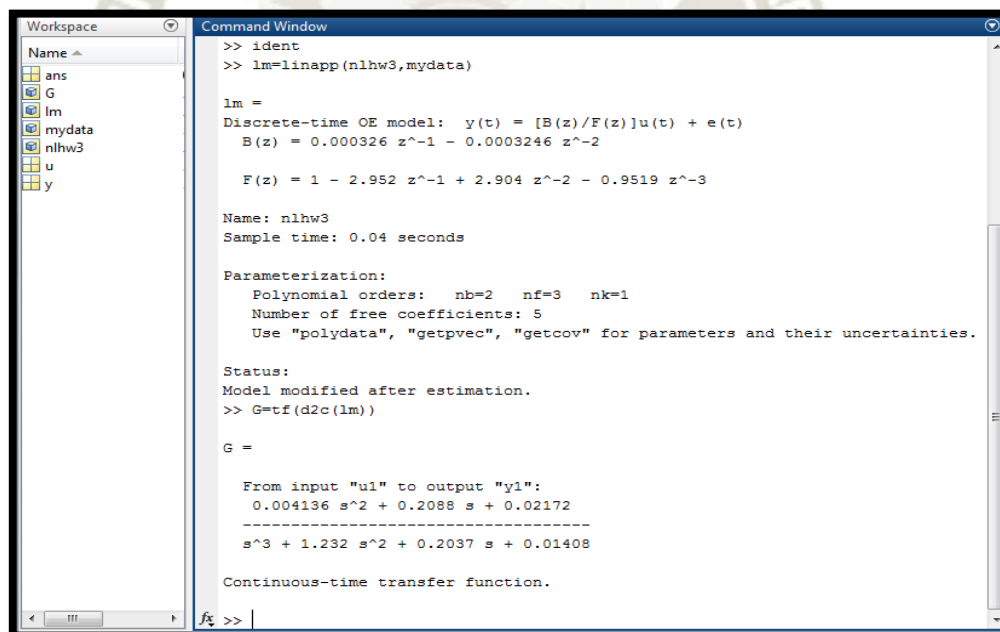
*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez que escogimos el modelo que mejor se aproximaba al sistema real, entonces es que lo llevamos a la herramienta LTI Viewer para ver si al linealizar el modelo, este será estable, y como vemos en la siguiente figura, si es estable a lazo abierto.



**Figura 3.40.** Respuesta del sistema a lazo abierto  
*Fuente: Elaboración Propia*

Al comprobar que el sistema es lineal, entonces hallaremos la función de transferencia que modela dicha aproximación



```

Workspace
Name
ans
G
lm
mydata
nlhw3
u
y

Command Window
>> ident
>> lm=linapp(nlhw3,mydata)

lm =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
  B(z) = 0.000326 z^-1 - 0.0003246 z^-2
  F(z) = 1 - 2.952 z^-1 + 2.904 z^-2 - 0.9519 z^-3

Name: nlhw3
Sample time: 0.04 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: nb=2 nf=3 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Model modified after estimation.
>> G=tf(d2c(lm))

G =
From input "u1" to output "y1":
  0.004136 s^2 + 0.2088 s + 0.02172
  -----
  s^3 + 1.232 s^2 + 0.2037 s + 0.01408

Continuous-time transfer function.
  
```

**Figura 3.41.** Linealización y obtención de la función de transferencia.  
*Fuente: Elaboración Propia*

```
>> lm=linapp(nlhw3,mydata)
```

```

lm =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
  B(z) = 0.000326 z^-1 - 0.0003246 z^-2
  F(z) = 1 - 2.952 z^-1 + 2.904 z^-2 - 0.9519 z^-3
  
```

```

Name: nlhw3
Sample time: 0.04 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: nb=2 nf=3 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Model modified after estimation.
>> G=tf(d2c(lm))

G =

From input "u1" to output "y1":
  0.004136 s^2 + 0.2088 s + 0.02172
-----
  s^3 + 1.232 s^2 + 0.2037 s + 0.01408

Continuous-time transfer function.

>> G1=feedback(G,1)

G1 =

From input "u1" to output "y1":
  0.004136 s^2 + 0.2088 s + 0.02172
-----
  s^3 + 1.236 s^2 + 0.4125 s + 0.0358

Continuous-time transfer function.

>> step(G1)
    
```

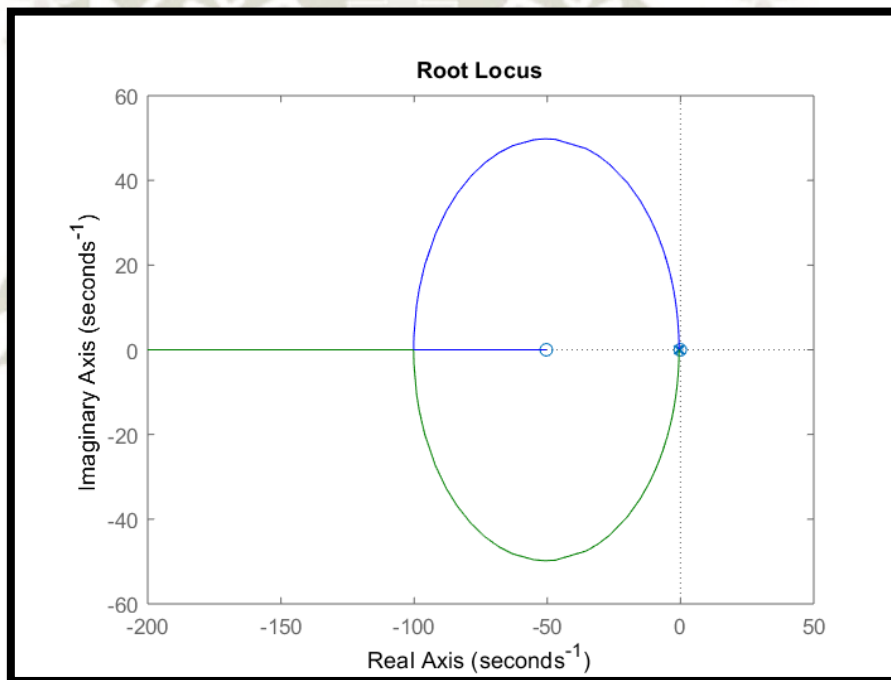
Una vez obtenida la función de transferencia a lazo cerrado (G1), entonces ya podemos aplicarle un controlador PID.

Como se observa en la figura, el sistema modelado no llega a alcanzar el Set Point fijado y es una representación de la realidad, entonces si se puede usar para aplicarle un controlador PID que corrija el error en estado estacionario.

Mediante el siguiente programa encontraremos las raíces de la función de transferencia que describe el sistema, y como se ve en la figura se ve que es estable.

```
clear all, close all, clc
num=[0.004136 0.2088 0.02172];
den=[1 1.232 0.2037 0.01408];
G=tf(num,den)
Gr=feedback(G,1)
rlocus(Gr)
```

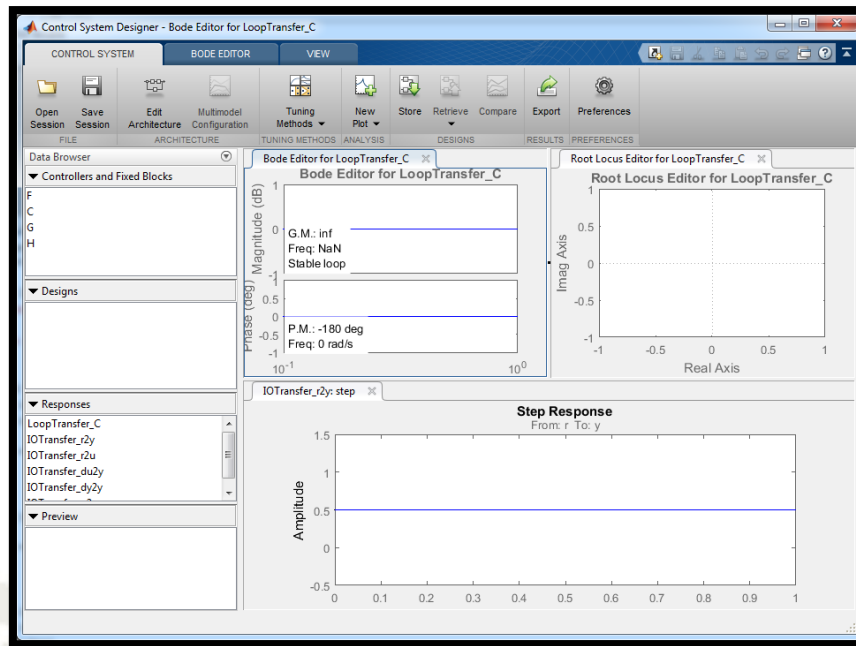
Este es el lugar geométrico de las raíces para el sistema sin controlador:



**Figura 3.42.** Lugar de raíces del sistema

*Fuente: Elaboración Propia*

Ahora mediante la herramienta Control and Estimation tools Manager, conocido como Sisotool, en la siguiente figura se muestra la ventana principal; se decidió usar el método de lugar de raíces ya que el método de Ziegler-Nichols hacía que el sistema tenga mucho sobreimpulso.



**Figura 3.43.** Ventana principal de la herramienta “Sisotool”

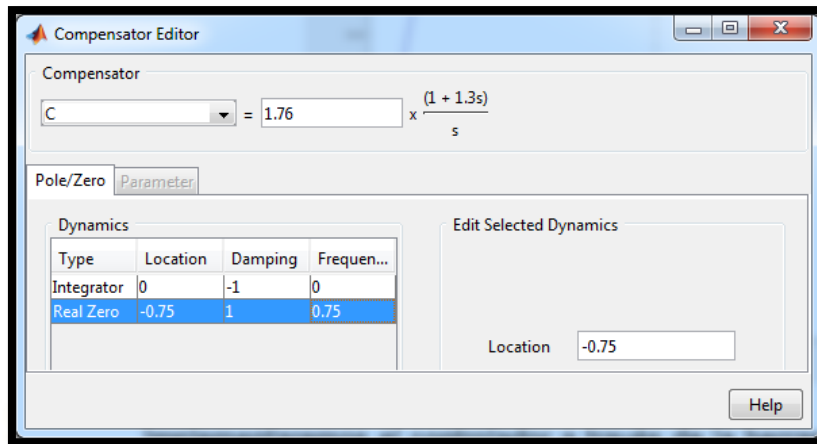
*Fuente: Elaboración Propia*

Condiciones de diseño, ya que se requiere que el sistema sea críticamente amortiguado y al ser un sistema hidráulico no se le exige mucha velocidad, como si se exigiría a un sistema neumático.

- $M_p=1\%$
- $T_a(2\%) < 4 \text{ seg}$

Ya que la condición más importante es que el máximo sobre impulso sea 1%, es que el tiempo de establecimiento quedará relegado a segundo lugar; por tal motivo es que usaremos un controlador del tipo PI ya que se adecua mejor a la respuesta del sistema deseada que es parecida a un sistema de orden 1 (circuito R-C)

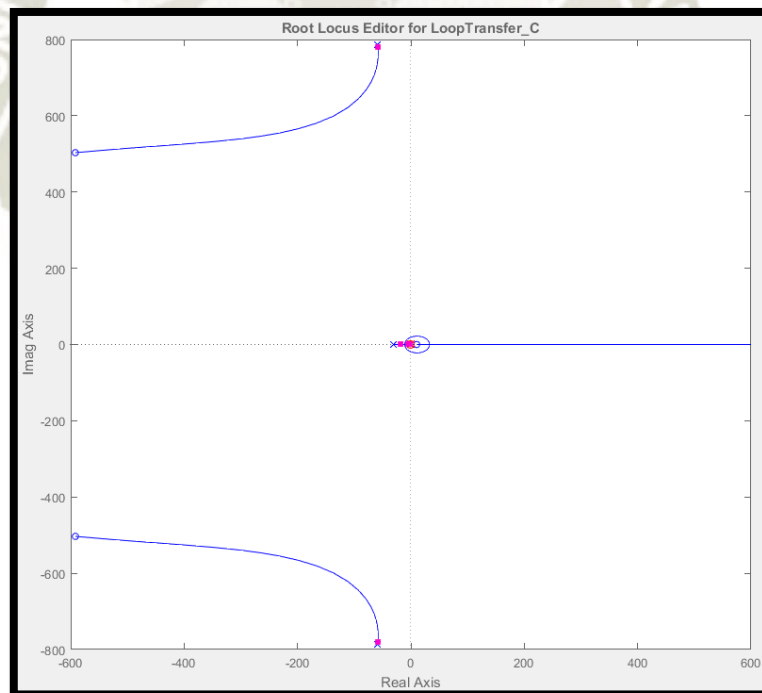
En la siguiente ventana se muestra la edición del compensador, al ser un controlador PI, se agrega un integrador en el origen y un cero Real y se mueven las raíces para lograr la respuesta requerida en las condiciones de diseño.



**Figura 3.44.** Ventana Compensator Editor.

*Fuente: Elaboración Propia*

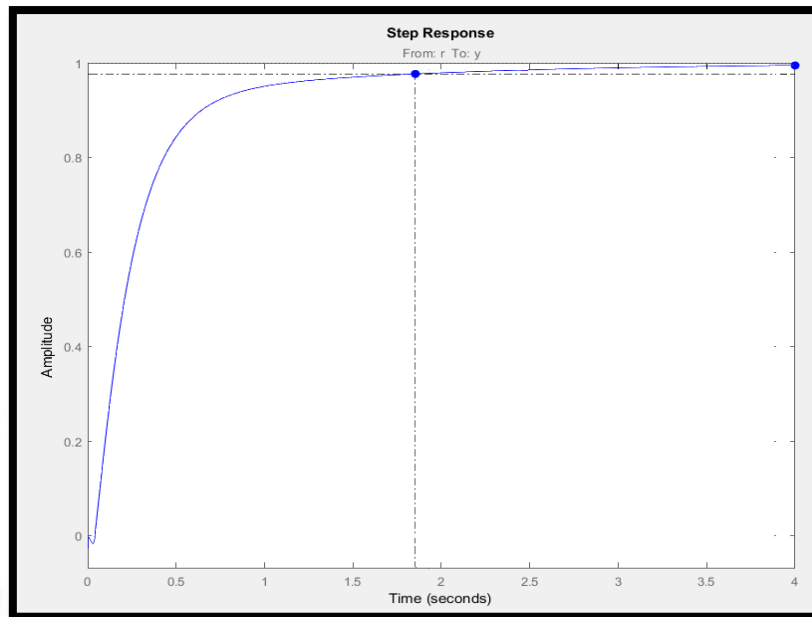
En la siguiente figura se muestra como se modifico el lugar de raices a la adición de un integrador y un Zero real



**Figura 3.45.** Lugar de Raices modificado.

*Fuente: Elaboración Propia*

Entonces el sistema nos dio la siguiente respuesta al escalón unitario:



**Figura 3.46.** Respuesta del sistema aplicando el controlador PI.

*Fuente: Elaboración Propia*

Sabiendo que:  $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$ , comparamos la ecuación que nos da el compensador

$$C = 1.76 * \frac{(1 + 1.3s)}{s} = 2.288 + \frac{1.76}{s} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

**Entonces  $K_p= 2.288$  y  $K_i= 1.76$ .**

## 3.2. Componentes a emplear

En esta sección, se definirá todos los componentes hidráulicos y electrónicos a usar y explicar el porqué de su uso, también se definirá un esquema detallando todas las conexiones necesarias.

Los componentes a utilizar son:

- Potenciómetro lineal
- Amplificador electrónico
- Regulador PID
- Fuente 24 VDC
- Cilindro hidráulico
- Válvula proporcional 4/3
- Slider
- Filtro hidráulico

### 3.2.1. Potenciómetro lineal

La elección de este componente, fue de vital importancia ya que es la parte que nos indicará la posición de nuestro actuador.



**Figura 3.47.** Potenciómetro lineal KTC-1 modelo 200 mm

*Fuente: Shenzhen Miran Technology Co., Ltd, 2018*

Elegimos el transductor de la marca Miran Technology modelo KTC-1 de 200mm de carrera, parecido a un cilindro, al ser un potenciómetro resistivo de 5kOhms, de acuerdo a la alimentación que se le da, este nos dará una señal que será un porcentaje del voltaje de entrada.

Es por esto que debimos adicionar un módulo conversor de la tensión de salida, del mismo fabricante, este convierte cualquier señal de voltaje DC, por ejemplo, si se alimentó con 24 o 15 VDC la salida siempre estará en el rango de 0-10 VDC

Ya que es absolutamente necesario conectar la alimentación del transductor a la perilla de 15 VDC de la tarjeta Regulador PID, es que es necesario usar este módulo, el fabricante recomienda conectarlo a esta toma ya que tiene mayor filtrado y está aislado eléctricamente del resto del circuito (tierra analógica).

La siguiente figura muestra el módulo, con 4 conexiones: positivo, negativo, salida y tierra, la salida se mide respecto al negativo



**Figura 3.48.** Convertidor DC-DC.

*Fuente:* Shenzhen Miran Technology Co., Ltd, 2018

Antes de identificar el sistema, procedemos a hallar la curva de linealidad del potenciómetro a utilizar, para poder fijarlo de manera correcta al actuador hidráulico

Se hizo en 2 tramos, a considerar:

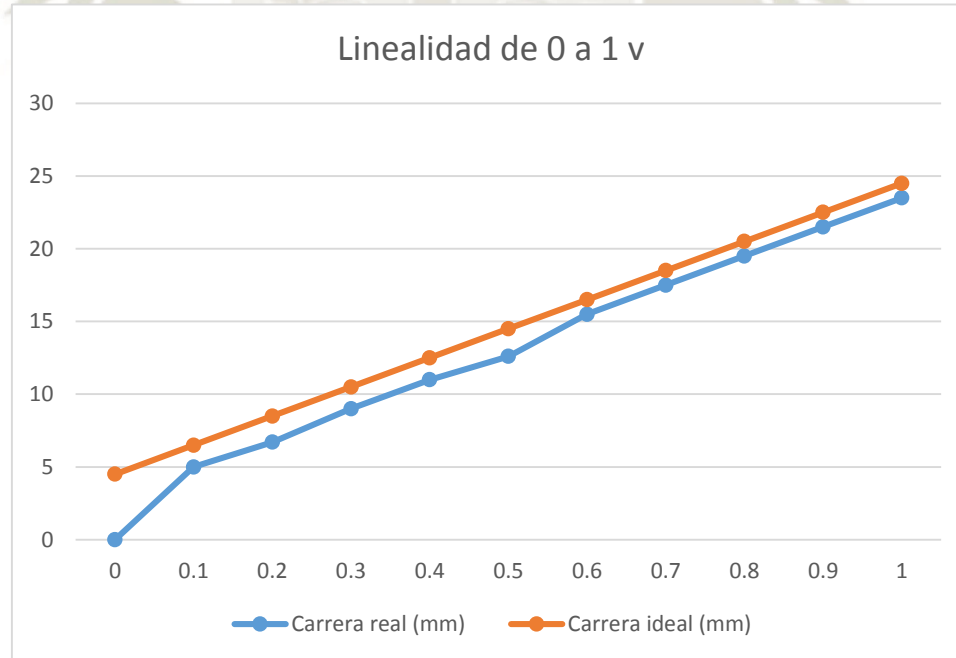
**Tramo 1: de 0 a 1 voltio.**

**Tabla 6.** Tabla señal de salida vs Carrera

Salida (VDC)	Carrera real (mm)	Carrera ideal (mm)
0	0	4.5
0.1	5	6.5
0.2	6.7	8.5
0.3	9	10.5
0.4	11	12.5
0.5	12.6	14.5
0.6	15.5	16.5
0.7	17.5	18.5
0.8	19.5	20.5
0.9	21.5	22.5
1	23.5	24.5

*Fuente: Elaboración propia*

Se observa un salto de 0 mm a 5 mm, aun en la carrera llamada “ideal”, se muestra una zona muerta de 4.5 mm, se puede apreciar mejor en la siguiente figura.



**Figura 3.49.** Zona muerta

*Fuente: Elaboración propia*

### Tramo 2: de 0 a 10 voltios

El anterior tramo nos sirvió para poder determinar la zona muerta y la linealidad que tiene nuestro transductor en la región más cercana al 0, en este tramo se verá los voltajes de salida a través de toda la carrera del transductor, los resultados se muestran en la figura 3.8.

**Tabla 7.** Linealidad completa de potenciómetro

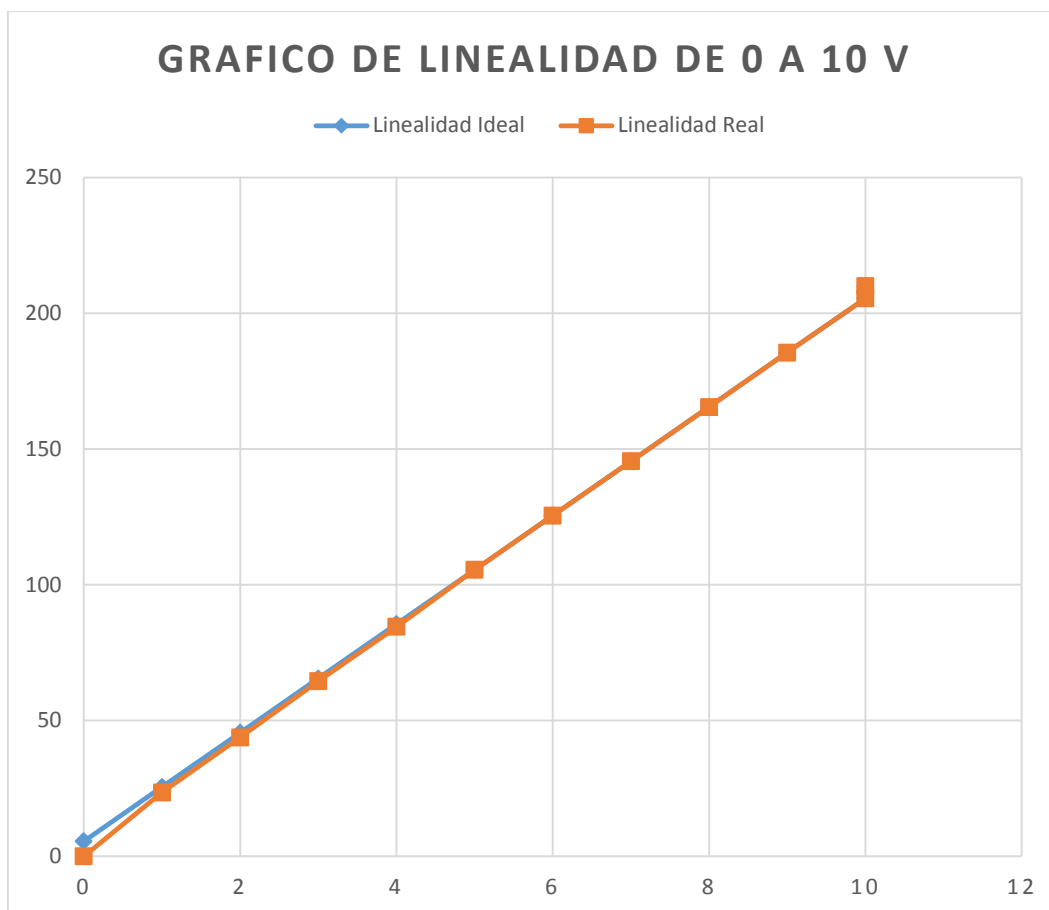
Salida (VDC)	Carrera real (mm)	Carrera ideal (mm)
0	0	5.5
1	23.5	25.5
2	43.8	45.5
3	64.5	65.5
4	84.5	85.5
5	105.5	105.5
6	125.5	125.5
7	145.5	145.5
8	165.5	165.5
9	185.5	185.5
10	205.5	205.5
10	210	210

*Fuente: Elaboración propia*

Como se observa en la siguiente figura, la linealidad del potenciómetro es mayor en el rango de 2 a 10 VDC, entonces dadas estas condiciones, nuestro sistema funcionará mejor en dicho rango, el controlador se encargará de corregir la desviación producida por la no linealidad en el primer tramo del transductor.

Como se observa, en el último trayecto de la curva hay una zona muerta, pero no influirá en nuestro estudio. La histéresis es otro factor a considerar, se realizaron las mediciones y es de 1mm

También se tiene que tomar en cuenta el desfase de 5.5 mm que existe, ya que idealmente el transductor, en su carrera a 200 mm, debería darnos 10 volts, pero este recién llega a los 10 volts cuando su carrera es 205.5



**Figura 3.50.** Salida real vs. Salida ideal del transductor de desplazamiento  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.2. Regulador PID

Se usará la tarjeta electrónica de Festo® conocida como Regulador PID, ya que reemplazará a un controlador como puede ser un PLC o en su defecto un microcontrolador, ya que su uso no requiere de programación.

Este controlador funciona con 24 VDC y nos provee una toma de 15 VDC para la conexión de transductores ya que esta salida es filtrada reduciendo el ruido que podría llegar al transductor; tiene 2 entradas “W” para el fijar el Set Point en valores de  $\pm 10$  VDC, “X” será la señal del transductor, en este caso será de 0 – 10 VDC y una salida “Y” que irá conectada al amplificador electrónico limitada a  $\pm 10$  VDC; también cuenta con una perilla de selección que tendrá que estar en la posición de ‘-10V...10V’, esto para lograr que el vástago del pistón retroceda; para hacer los ajustes de los

parámetros PID contamos con perillas para poder calibrar y establecer los valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , en ellas la elección de su utilización es independiente; también contamos con una perilla de Offset que sumará o restará un voltaje, puede o no utilizarse.

El offset nos puede ayudar a corregir un error en estado estacionario ya que su rango es de -7 a 7 voltios.

Cabe resaltar que ambas tensiones de trabajo: 24 y 15 VDC cuentan con 2 tierras separadas, la tierra física (0V) y la analógica (GND), estas no deben juntarse ya que provocarían mediciones erróneas; a su vez también se cuentan con LEDs que nos indican la saturación de las 3 variables, la saturación está fijada a  $\pm 10$  VDC.



Figura 3.51. Regulador PID

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la figura, al poner la perilla multiplicadora en “0”, la acción de tipo Integral y Derivativa se vuelven nulas, menos la acción proporcional, estas perillas se ponen a 1 para que se comporten como multiplicando la señal de voltaje por la unidad, sin ninguna amplificación.



**Figura 3.52.** Perillas de regulador PID  
*Fuente: Elaboración Propia*

De este modo se comporta solo como un comparador, sin ningún tipo de acción de control, más que comparar y diferenciar la entrada (Set Point) y la respuesta del sistema (señal del sensor).

También se ve que cada ganancia (P, I, D) cuenta con un pequeño LED que nos indica si es que está o no en funcionamiento.

*\*(Ir al Anexo 1 para ver la hoja de datos del Regulador PID)*

### 3.2.3. Tarjeta amplificadora

Este elemento tan importante en el control de las válvulas proporcionales, tanto hidráulicas como neumáticas, es el nexo entre la señal de control y la de potencia.

Contamos con la tarjeta llamada Amplificador Proporcional\* como se ve en la siguiente figura:



**Figura 3.53.** Amplificador Proporcional

*Fuente: (Festo, 2016)*

Según Festo Didactics: El amplificador permite el control de válvulas proporcionales. Está diseñado para que pueda ser accionado por dos solenoides independientes (1 canal) o una válvula con dos solenoides (2 canales), tal como una válvula proporcional de 4/3 vías. Con ello, el amplificador proporcional funciona como un amplificador de 1 o de 2 canales.

Las entradas están protegidas ante cortocircuitos y picos de hasta 24 V DC.

En este tipo de tarjetas podemos configurar tres tipos de corrientes para compensar la histéresis y no linealidad de las válvulas proporcionales.

Tenemos:

- Corriente básica  $I_{Basic}$ : es la corriente necesaria para vencer la resistencia mecánica al mínimo movimiento del spool de la válvula.

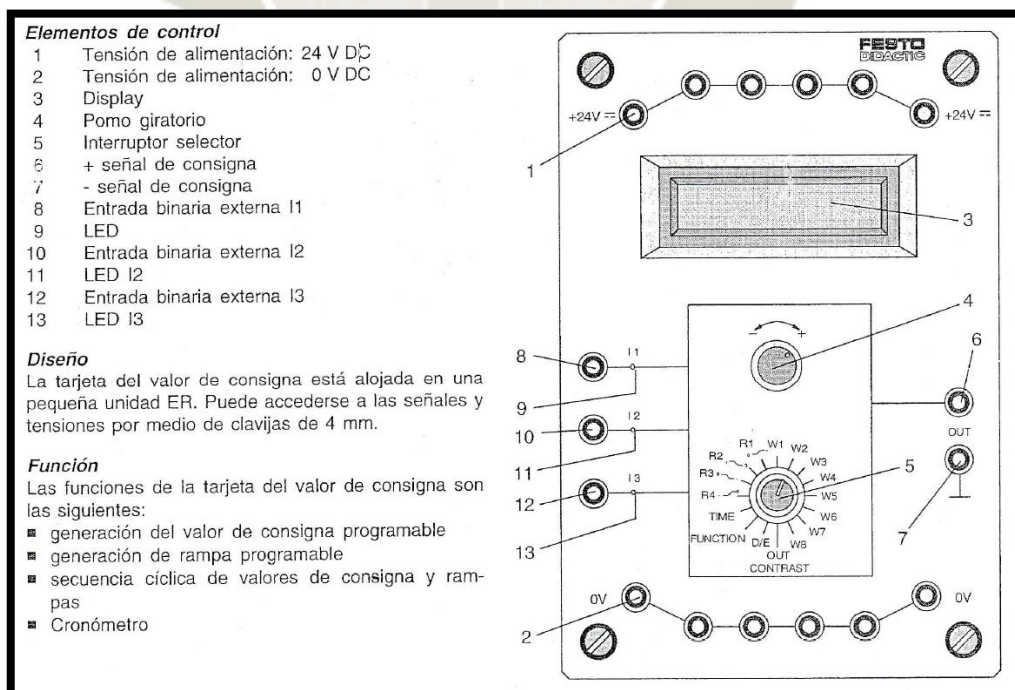
- Corriente de salto  $I_{Jump}$ : es el salto que la corriente da, desde los 0 amperios hasta una corriente que hará mover el spool a la mínima variación de la señal de voltaje, en este caso 0.1 voltios.
- Corriente máxima  $I_{Max}$ : es la corriente a la que se obtiene el máximo desplazamiento del spool, suele llegar hasta los 800 mA, pero depende de cada modelo de válvula.

En nuestro caso, no será necesario configurar estos parámetros ya que el Regulador PID, compensará el error producido por la zona muerta inherente a la construcción de las válvulas proporcionales.

*\*(Ir al Anexo 2 para ver información de la Tarjeta amplificadora)*

### 3.2.4. Tarjeta de Punto de Consigna

La utilización de esta tarjeta fue fundamental, tanto para realizar pruebas como para determinación de parámetros.



**Figura 3.54.** Tarjeta de punto de consigna

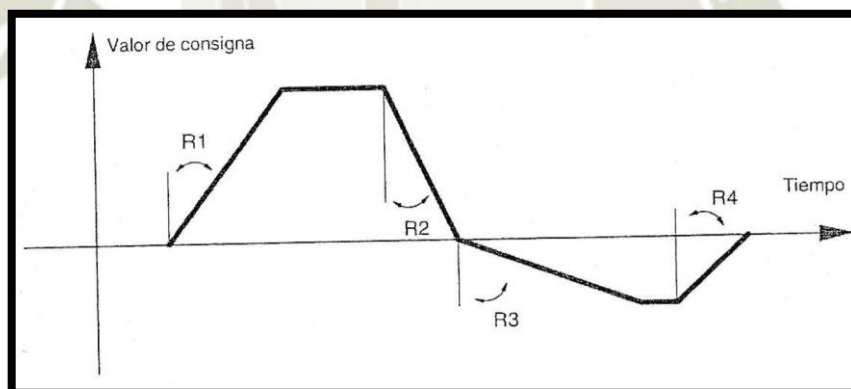
**Fuente:** (Festo, 2013)

Podemos seleccionar 3 modos de funcionamiento

- Esperar tiempo de conmutación
- Avanzar puntos de consigna
- Control Externo

En el modo de funcionamiento “Esperar tiempo de conmutación” los puntos de consigna avanzan secuencialmente cuando ha expirado el tiempo de cambio establecido; si se selecciona “Avanzar puntos de consigna”, cuando se alcanza el punto de consigna activo, empieza el siguiente punto sin retardo y por último, en el modo de funcionamiento “Control externo” la selección del punto de consigna activo se realiza aplicando a las entradas I1, I2 e I3.

Se pueden generar perfiles de tensión de -10 a 10 VDC, rampas ascendentes y descendentes con diferentes pendientes, desde los 0.1 seg/volt hasta los 10 seg/volt.



**Figura 3.55.** Tipos de rampas en la Tarjeta

*Fuente: (Festo, 2016)*

A la vez podemos especificar 8 diferentes puntos de consigna (W1 hasta W8) variando el voltaje con las perillas de regulación, estos valores se pueden escoger a través de entradas digitales siguiendo un comportamiento binario en cuanto a la elección de las entradas I1, I2 e I3, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 8.** Tabla de bits de entrada para selección de valor de consigna

Tabla de bits de entrada			
I3	I2	I1	Valor de consigna
0	0	0	W1
0	0	1	W2
0	1	0	W3
0	1	1	W4
1	0	0	W5
1	0	1	W6
1	1	0	W7
1	1	1	W8

*Fuente: Festo Didactics*

*\*(Ir al Anexo 3 para ver información de la Tarjeta de valor de consigna)*

### 3.2.5. Fuente de Poder

La selección de la fuente de poder dependerá del voltaje de operación de los componentes electrónicos y la corriente máxima a la que pueden llegar. Ya que contamos con las fuentes del laboratorio, solo nos remitiremos a dar las características de estos, el voltaje de operación de los componentes a usar es 24 VDC con una corriente de 4.5 Amperios, protegida contra cortocircuitos, de esta manera se cubre la carga consumida por los componentes electrónicos.



**Figura 3.56.** Fuente de Voltaje

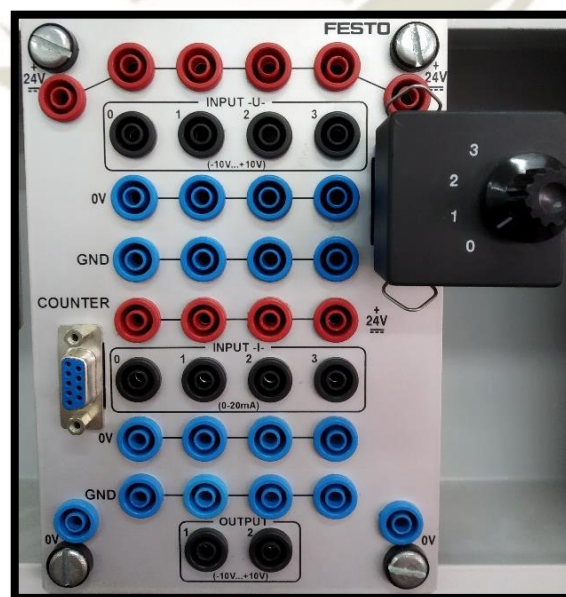
*Fuente: Festo, 2016*

### 3.2.6. Unidad de conexión analógica

Este componente nos servirá como selector, se puede utilizar tanto con voltaje como con corriente, cuenta con 4 canales para cada tipo de señal, de -10 a 10 volts y de 4 a 20 mA; y cuenta con 2 salidas a voltaje de -10 a 10 volts.

Para poder operar el selector, debemos tener un “interruptor de cambio de señal”, que nos permitirá seleccionar entre la señal de la tarjeta de Punto Consigna y la señal que le enviemos desde el Slider, que nos servirá como generador de señales.

En la bornera superior de color negro etiqueta como ‘INPUT -U-’, conectaremos las 2 señales de voltaje DC, en el “0” le conectaremos el Slider y en el “1” la Tarjeta de Valor de Consigna; siempre tomando como referencia las borneras “GND”, ya que la alimentación (24 VDC y 0 VDC), están aisladas eléctricamente de las señales de control; no usaremos las borneras ‘INPUT -I-’, ya que no usaremos señales en corriente para este proyecto; por último, esta tarjeta cuenta con 2 borneras ‘OUTPUT’ que son salidas en voltaje continuo, de estas 2, usaremos la salida “1” que será la que irá a la entrada W de la tarjeta Regulador PID.



**Figura 3.57.** Tarjeta Selectora de señales

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.2.7. Slider

Este componente será usado para la generación de trayectorias o fijación del punto consigna, al ser también un potenciómetro lineal, es que necesitaremos alimentarlo con 10 VDC para que la salida sea un porcentaje del voltaje de entrada, esto lo conseguiremos al alimentar desde la salida de otra tarjeta o fuente de 10 v externa.

Como se aprecia en la siguiente figura, su diseño es fácil de manipular, para poder establecer los SP especificados.



**Figura 3.58.** Slider modelo KFM 200 mm  
*Fuente: Shenzhen Miran Technology Co., Ltd, 2018*

### 3.2.8. Cilindro Hidráulico

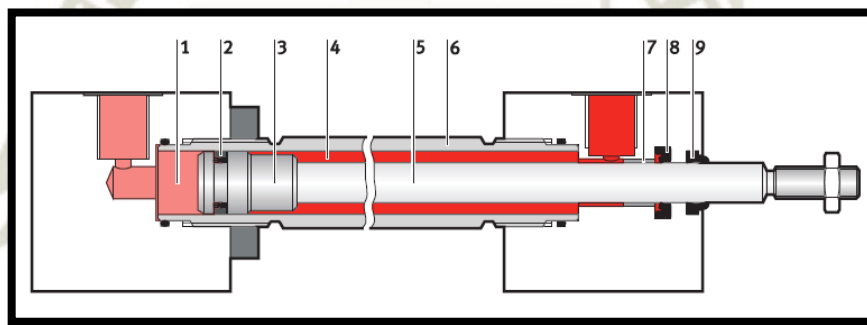
Entre los elementos terminales de los sistemas hidráulicos nos encontramos a los cilindros y los motores, estos son los encargados de convertir la energía hidráulica en energía mecánica aprovechable para realizar trabajo.

Según Festo:

Puesta en funcionamiento

Avance: El aceite entra en la cámara del lado del émbolo (1) a través de la conexión. Allí, la presión actúa sobre el émbolo (3). Considerando la presión y la superficie del émbolo se obtiene una fuerza que provoca el movimiento del cilindro. Ese movimiento desplaza el aceite contenido en la cámara del lado del vástago.

Retroceso: El aceite fluye hacia la cámara del lado del vástago (4), por lo que el émbolo vuelve a retroceder. Así, se evacua el aceite contenido en la cámara del lado del émbolo (1). La junta del émbolo (2) separa las dos cámaras, mientras que la junta del vástago hermetiza el sistema hacia el exterior. Las cintas de guía consiguen que los movimientos sean suaves y se produzcan sin desgaste. Además, compensan las fuerzas laterales que actúan sobre el vástago (6). El anillo rascador (9) tiene la función de proteger la junta del vástago (8), evitando que penetren partículas de suciedad. “En un cilindro de doble efecto puede aplicarse presión hidráulica en ambas superficies del émbolo. Por ello, estos cilindros pueden ejecutar un trabajo en ambos sentidos



**Figura 3.59.** Cilindro de doble efecto: corte  
*Fuente: Festo. (2013)*

Principio de funcionamiento de un cilindro de doble efecto:

- El líquido sometido a presión fluye hacia la cámara del cilindro del lado del émbolo. En esta cámara aumenta la presión, aplicándose una fuerza en la superficie del émbolo. Si esta fuerza supera la fuerza de la fricción estática, el émbolo avanza. La presión alcanza el nivel de presión de funcionamiento una vez que el émbolo avanzó completamente.

- Cuando el cilindro retrocede, el líquido sometido a presión entra en la cámara del lado del vástago. El émbolo retrocede y el líquido sometido a presión se evacúa de la cámara del lado del émbolo. (Festo. 2013.)

### 3.2.9. Válvula proporcional 4/3 vías

La válvula proporcional hidráulica es el componente donde se unen la electrónica y la hidráulica, es el pilar de la hidráulica proporcional.

Hay una variedad de válvulas, por ejemplo, las que solo poseen un solo solenoide que puede desplazarse en ambas direcciones y que además la única señal que se le envía es la de 0-10 VDC, entonces su centro estará en 5 VDC y en ese voltaje la válvula estará 'apagada'; también tenemos las válvulas que prescinden de amplificadores electrónicos, ya que cuentan con conexiones de potencia y de señal en su mismo cuerpo.

La válvula concerniente a nuestro estudio cuenta con 2 solenoides proporcionales, uno recibe de -10 a 0 volts y el otro de 0 a 10 volts, está la señal de voltaje transformada en corriente previamente por el amplificador, para excitar los solenoides; cuenta con 4 puertos y 3 posiciones de funcionamiento, los puertos son: Presión (P), Tanque (T), Puerto de trabajo A (A) y Puerto de trabajo B (B).

Existen varios tipos de válvulas 4/3, la diferencia principal es el tipo de centro que tienen, en este caso es "centro cerrado", ya que al encontrarse desenergizada, esta permanecerá en su posición central siendo centrada permanentemente por resortes; en esta posición no sale ni entra aceite de la válvula, en teoría es estanca, pero debemos recordar que todas estas válvulas siempre tienen pérdidas ya que son auto lubricantes.

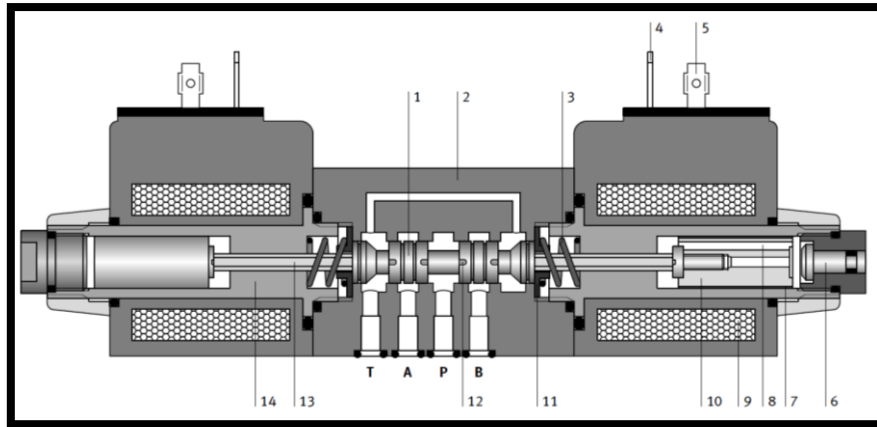


**Figura 3.60.** Válvula proporcional hidráulica de 4 vías y 3 posiciones  
*Fuente:* (Festo, 2016)

Según el fabricante Festo:

La válvula proporcional de 4/3 vías está montada en una placa de función con cuatro conectores de acoplamiento. Las cuatro conexiones eléctricas están equipadas con enchufes de seguridad. El componente está instalado en el sistema de rejilla del tablero de ensamblaje ranurado por medio de las dos palancas azules (variante de montaje "A"). La válvula consta de: Pistón (1), alojamiento (2), resorte (3), contacto de puesta a tierra (4), Conexiones eléctricas de solenoide (5), anulación manual de emergencia (6), cojinete de deslizamiento (7), orificio de compensación (8), bobina solenoide (9), hundimiento (10), disco de resorte (11), muesca de control (12), vástago (13), tubo de presión (14).

Toda la descripción de componentes internos de la válvula que da el fabricante se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 3.61.** Corte transversal válvula 4/3  
*Fuente: Manual Festo*

### 3.2.10. Electroválvula 4/2 vías

Esta válvula la usaremos como parte del sistema de protección del circuito hidráulico, se usará para evitar que cuando la presión suba a su límite fijado en 5 MPa, la válvula limitadora de presión no se active, ahora bien, al abrirse la válvula limitadora de presión, lo que provoca es que calienta el aceite presurizado y el problema del aceite caliente y con burbujas es que baja la viscosidad y vuelve menos viscoso el aceite, probocando que los circuitos hidráulcos fallen.



**Figura 3.62.** Electroválvula 4/2 vías  
*Fuente: (Festo, 2016)*

### 3.2.11. Filtro Hidráulico.

Ya que nosotros necesitamos que los movimientos del cilindro sean lo más precisos posibles, y también ya que las válvulas proporcionales son construidas con más precisión que el resto de válvulas, es que necesitamos controlar la calidad y limpieza del aceite; esto lo logramos adicionando un filtro de partículas a la salida de presión de la bomba.

Según Festo:

La tarea del filtro consiste en retener agua y sustancias sólidas contenidas en el aceite (virutas, polvo, etc.). El filtro deberá montarse preferentemente inmediatamente detrás de la bomba, con el fin de proteger todos los componentes hidráulicos. El aceite fluye desde la conexión P hacia la tapa (1) a través del cuerpo (5). El aceite atraviesa el filtro (6) desde el exterior hacia el interior. Desde el interior del filtro fluye hacia la conexión A a través de la válvula antirretorno (8). Esta válvula (8) evita que el aceite fluya a través del filtro en sentido contrario

Este filtro tiene un sistema antirretorno y su porosidad es de  $5\ \mu\text{m}$



**Figura 3.63.** Filtro hidráulico  
*Fuente: (Festo, 2016)*

### 3.3. Diseño de los Circuitos

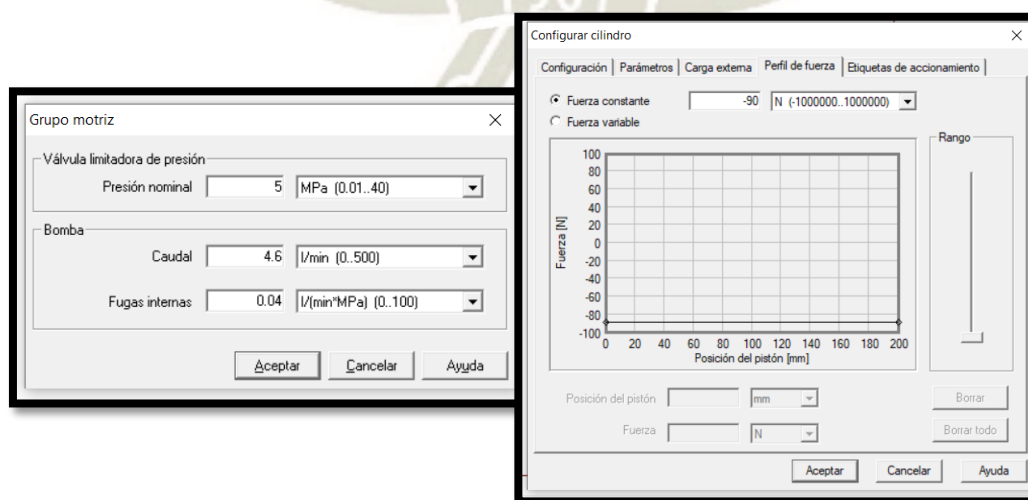
Festo Didactics cuenta con un simulador FluidSIM H utilizado para la creación y estudio de los circuitos electro-hidráulicos y además contiene todos los elementos, necesarios con sus respectivas descripciones de características que necesitamos conocer para poder simular el circuito y probar su funcionamiento antes de poder implementarlo en el panel modular.

Una vez definidos todos los componentes necesarios, es posible realizar un esquema o diagrama que indique como es que se integran los componentes.

Tenemos dos tipos de circuitos uno hidráulico y uno eléctrico, ambos funcionan en conjunto y se simularon en el software FluidSIM H® de Festo®

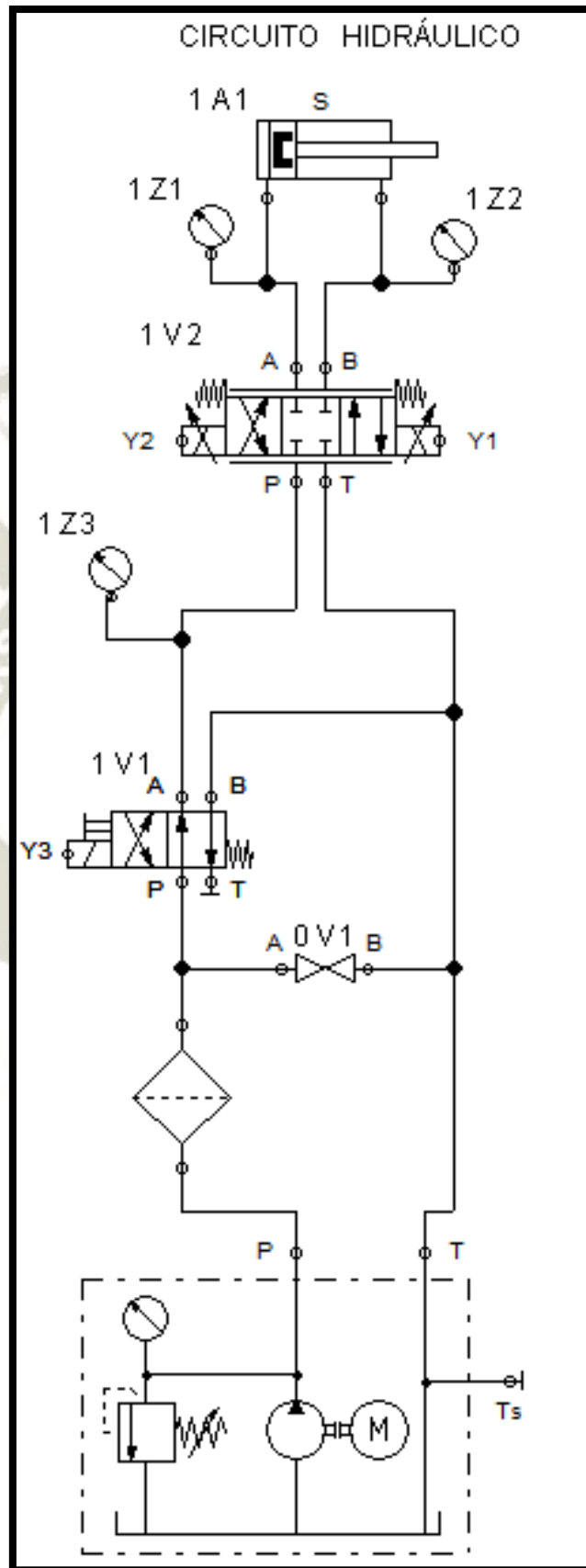
Se presenta a continuación el circuito hidráulico para el cilindro sin carga y a continuación el cilindro con carga.

También se establecerá los parámetros de funcionamiento de la bomba, vale decir presión y caudal; para el circuito con carga, se establecerá el perfil de fuerza de -90 N. para que el cilindro “jale” el peso.

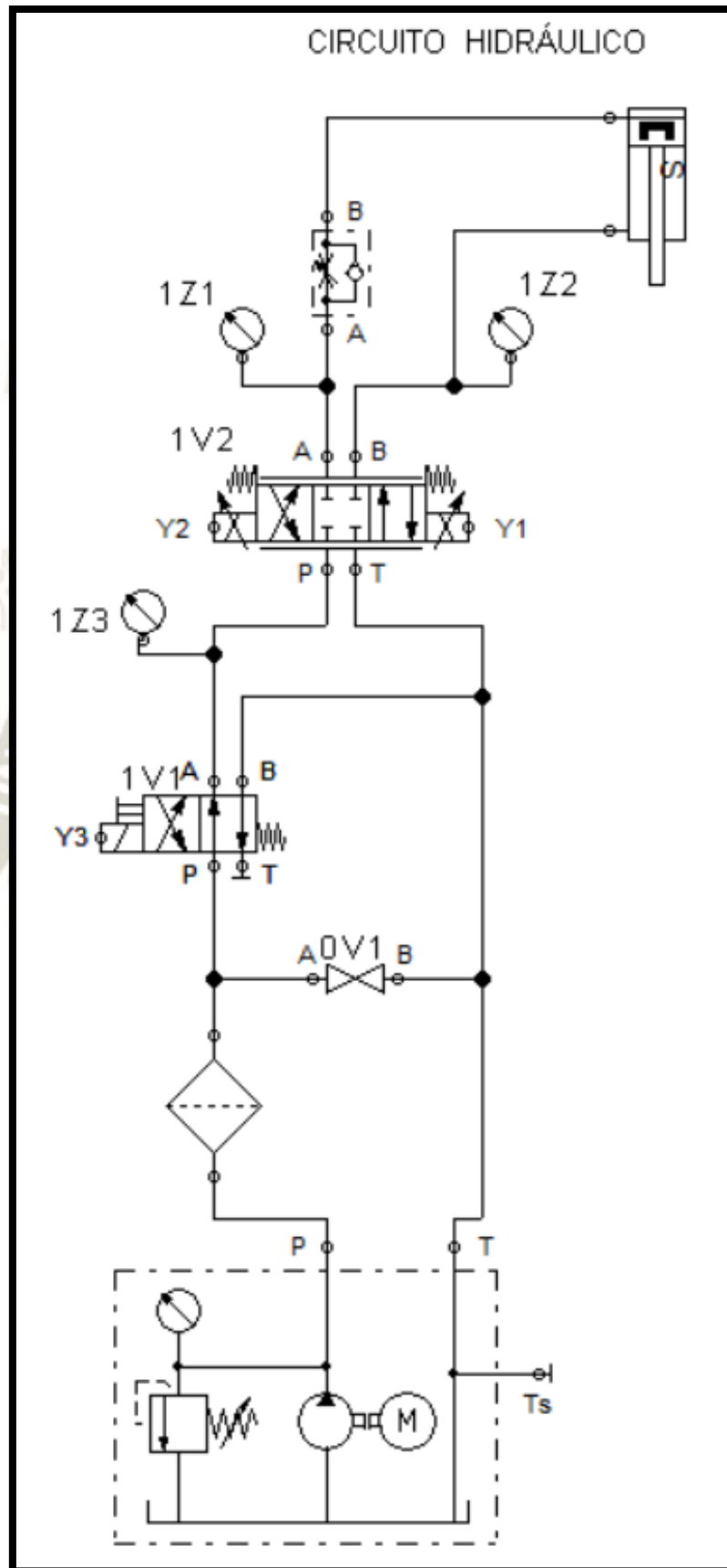


**Figura 3.64.** Configuraciones en el simulador.

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 3.65.** Circuito Hidráulico cilindro sin carga  
*Fuente: Elaboración propia*



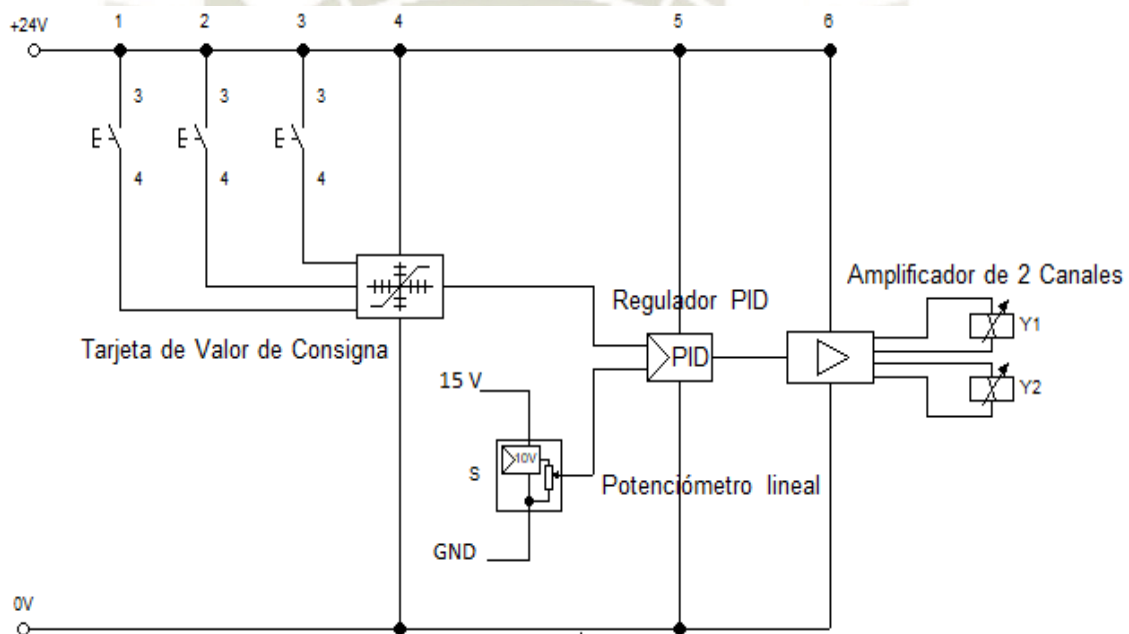
**Figura 3.66.** Circuito Hidráulico cilindro con carga de 90 N  
*Fuente: Elaboración propia*

Para el circuito eléctrico tenemos 2 posibilidades.

Debido a que para la fijación del valor de consigna (Set-Point) podemos escoger varios caminos, lo importante es poder dar una señal analógica en voltaje en los rangos de 0 a 10 voltios.

Podemos usar un generador de señales, un generador de rampas, transductores de desplazamiento como sliders, etc.

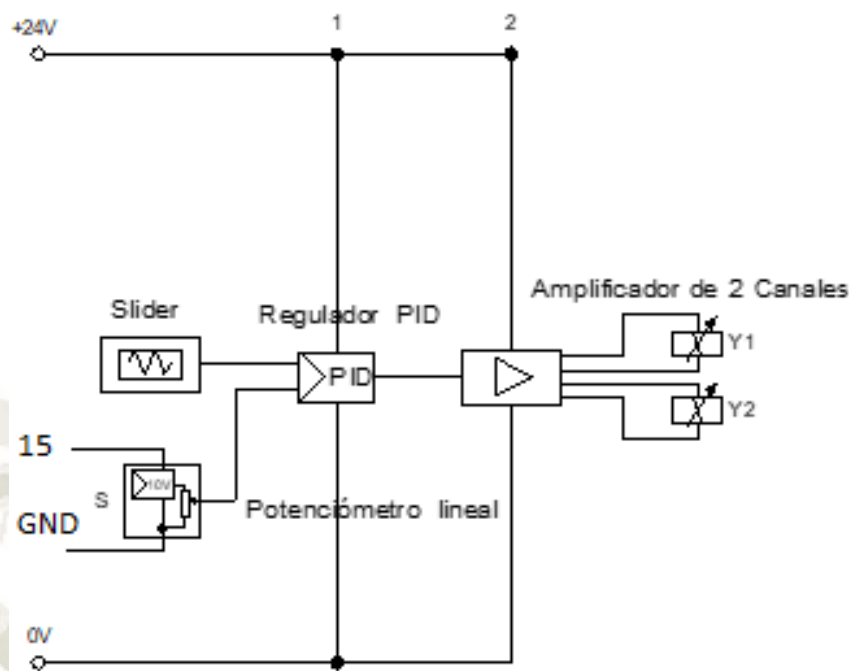
1.4. Fijación de Set-Point a través de una tarjeta de generación de señales y rampas



**Figura 3.67.** Circuito Eléctrico, con tarjeta Punto consigna

*Fuente: Elaboración propia*

1.5. Fijación de Set-Point a través de Un Slider lineal (representado como un Generador de señales)



**Figura 3.68.** Circuito eléctrico con Slider  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4. Implementación

La implementación se verá resumida al montaje y puesta a punto de los componentes en las placas ranuradas de los módulos didácticos del laboratorio de Oleohidráulica y Neumática de la Universidad Católica de Santa María.

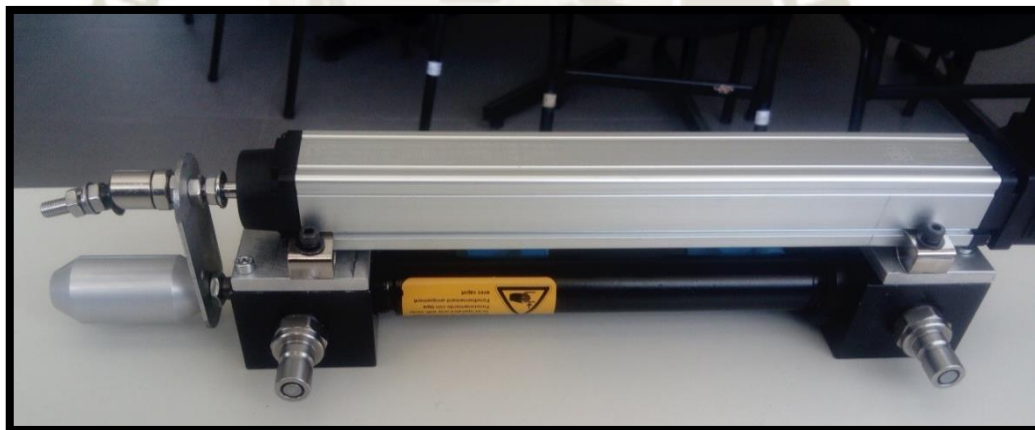
Antes de poder hacer pruebas necesitábamos poder ensamblar todos los componentes, en especial el cilindro hidráulico y el potenciómetro lineal, es por eso que se fabricaron planchas de aluminio para poder hacer el montaje del potenciómetro sobre el cilindro, todo se realizó en el laboratorio de Procesos de Manufactura.

Como se observa en la siguiente figura, se maquinó los acoples en la fresadora.



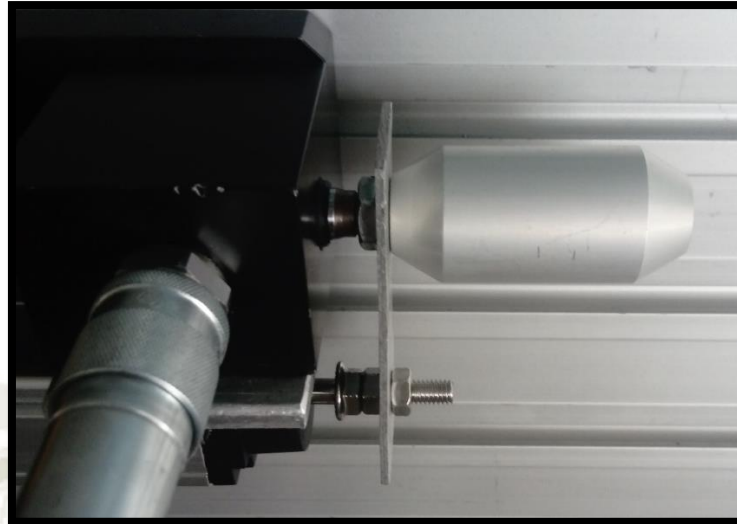
**Figura 3.69.** Maquinado de planchas de acople  
*Fuente: Elaboración Propia*

En la siguiente figura se muestran todo el subsistema montado (potenciometro y cilindro hidráulico).



**Figura 3.70.** Planchas de aluminio para fijar potenciómetro al cuerpo del cilindro  
*Fuente: Elaboración Propia*

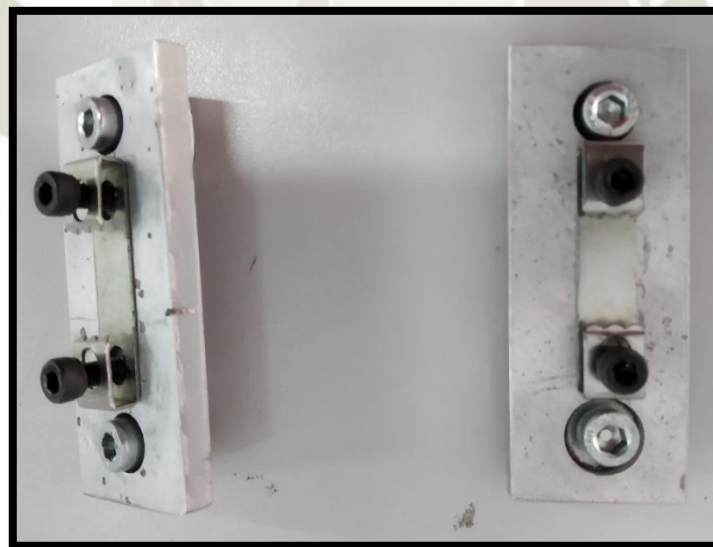
Una vez montados ambos componentes, había que pensar una forma de relacionar ambos vástagos para que este subsistema se comporte como 1 solo componente, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.71.** Montaje de plachuela para la unión de ambos vástagos

*Fuente: Elaboración Propia*

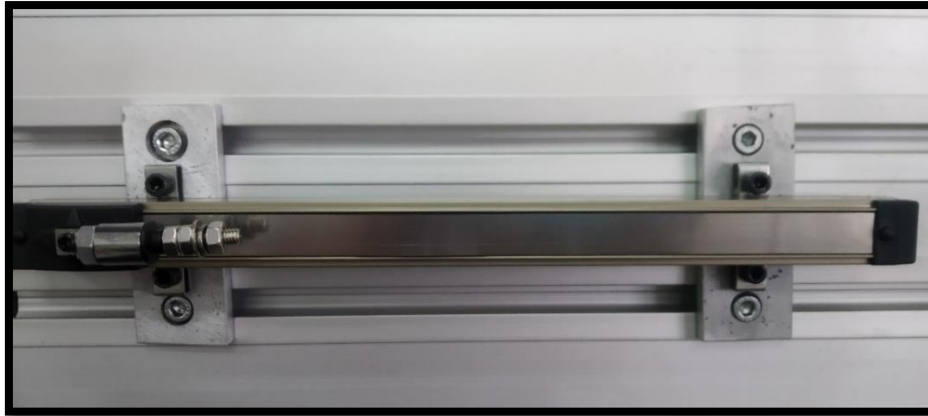
También se fabricaron acoples para un segundo potenciómetro tipo Slider que servirá como un generador de señales en el rango de 0-10 VDC



**Figura 3.72.** Montaje de plachuela para la unión de ambos vástagos

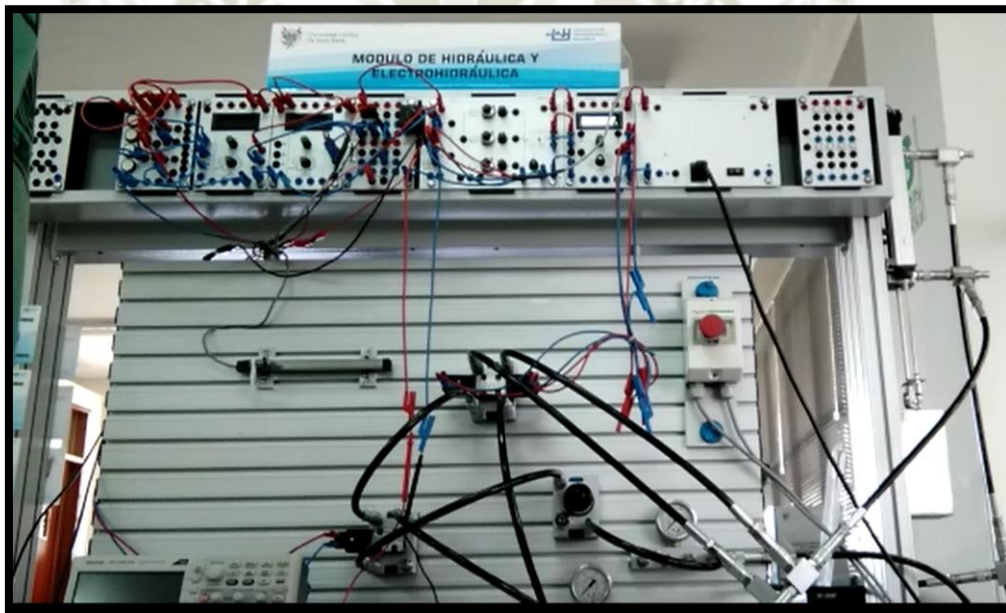
*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez hechos estos acoples, entonces podemos dar pase al montaje en el panel perfilado de aluminio.



**Figura 3.73.** Montaje Slider en el perfil  
*Fuente: Elaboración Propia*

Finalmente los componentes quedaron montados como muestra la siguiente figura



**Figura 3.74.** Montaje final de los componentes  
*Fuente: Elaboración Propia*

## CAPITULO IV

### 4. Pruebas y Resultados

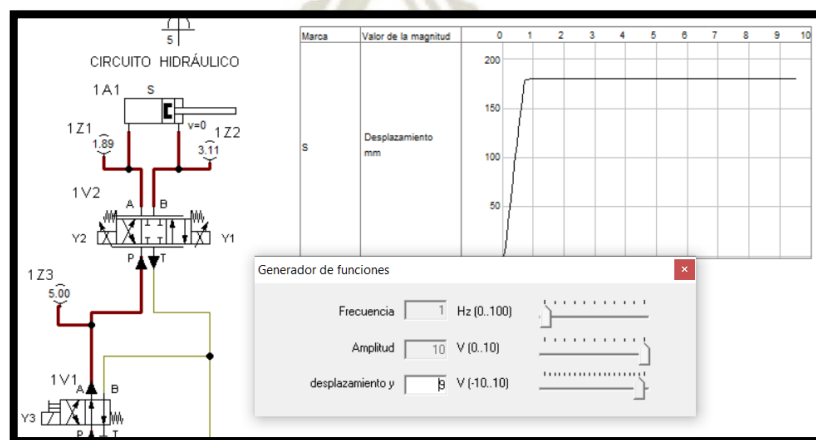
En el presente capítulo se demostrará el funcionamiento del sistema, la puesta a punto, las gráficas de la respuesta temporal a los distintos Set-Points escalones o trayectorias. Así mismo, se evaluará la respuesta del controlador PID analógico con mayor claridad frente a distintas señales de referencia.

Se mostrará los resultados de la simulación en el software FluidSim-H y también las gráficas sacadas a través de un osciloscopio.

#### 4.1. Simulaciones

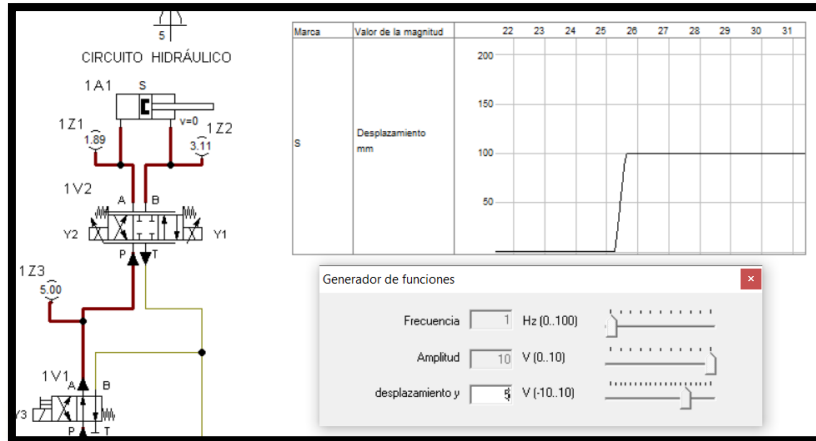
Como en todo proceso, es necesario realizar simulaciones de las rutinas o procesos a implementar, justamente por eso, es necesario realizar simulaciones para tener una idea de cómo se comportará el sistema real.

Se presentará en las siguientes figuras, las simulaciones hechas con el software FluidSim H en las que se muestra como el pistón sigue una trayectoria.



**Figura 4.3.** Simulación sistema sin peso.

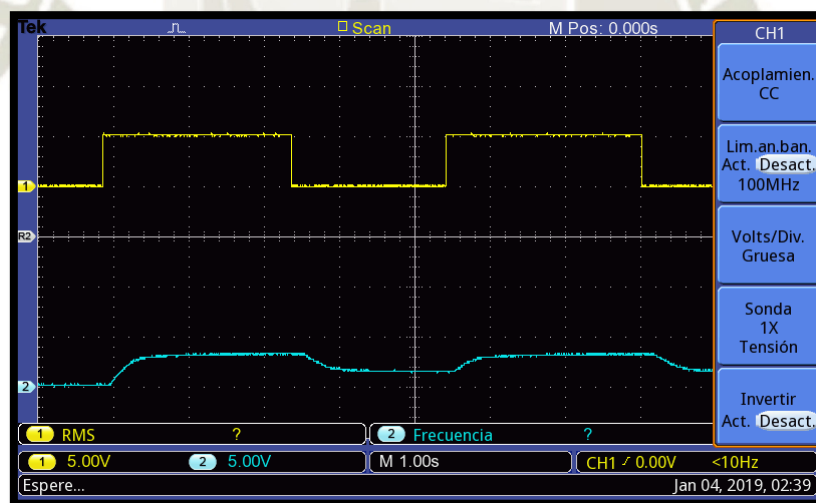
*Fuente: Elaboración Propia*



**Figura 4.4.** Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP  
*Fuente: Elaboración Propia*

## 4.2. Pruebas del sistema sin controlador

El sistema se sometió a distintos Set-Points, estando en lazo cerrado sin ninguna acción de control y respondió tal como se muestra en las siguientes figuras.



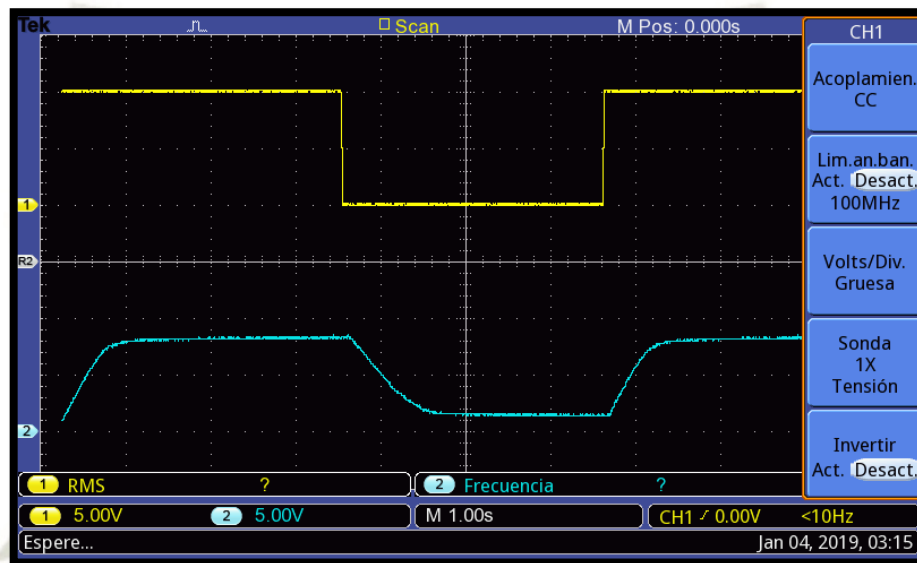
**Figura 4.1.** Sistema a lazo cerrado para un SP de 5 VDC.  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se ve en la anterior figura, existe un error en estado estacionario muy grande, al aplicar el escalón llega a los 3.4 volts y de ahí sigue la curva tendiendo al 3.5 volts; al retirar el escalón estabiliza a los 1.39 volts, esto quiere decir, haciendo una regla de 3, que a la subida presenta un error en estado estacionario del 28.8%.

El tiempo de establecimiento del sistema se obtiene de la data que nos da la gráfica y es de 1.20 segundos.

Se observa que el sistema no presenta picos, sino que más bien se comporta como un sistema de primer grado parecido a un circuito R-C.

Al aplicar un escalón de 10 VDC entonces el resultado es el siguiente:



**Figura 4.2.** Sistema a lazo cerrado para un SP de 10 VDC.

*Fuente: Elaboración Propia*

Se observa que persigue las mismas condiciones mostradas al aplicar el escalón de 5 VDC, se hizo la correspondiente adquisición de data y el resultado es el siguiente: no llega a alcanzar el SP, solo alcanzando 8.4 volts y al regreso no llega al 0 volts, sino que se queda en 1.4 volts, esto quiere decir que el error en estado estable a la subida es de 16%; el tiempo de establecimiento es más rápido, dando solo 0.9 seg.

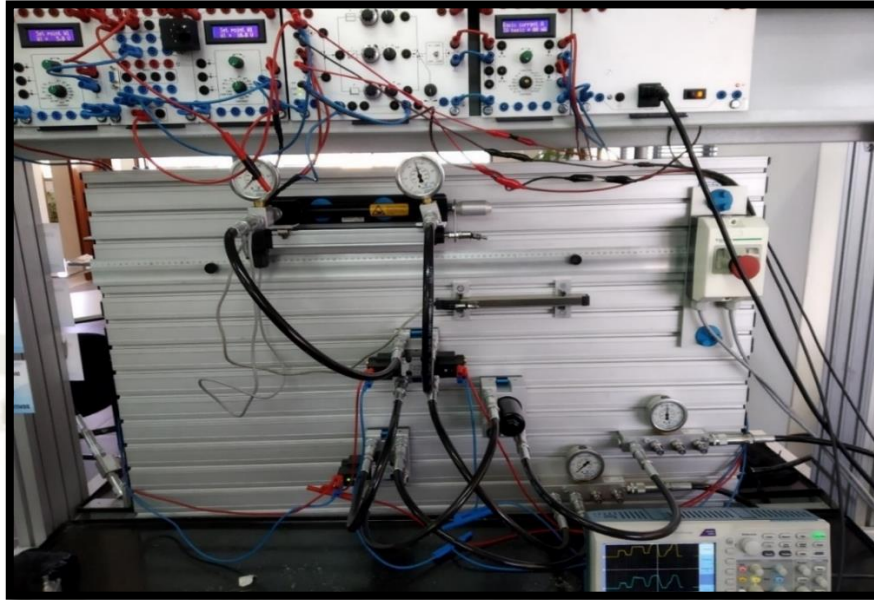
### 4.3. Pruebas con controlador

Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de Oleohidráulica y Neumática.

Se realizarán pruebas para poder validar lo hallado en las simulaciones.

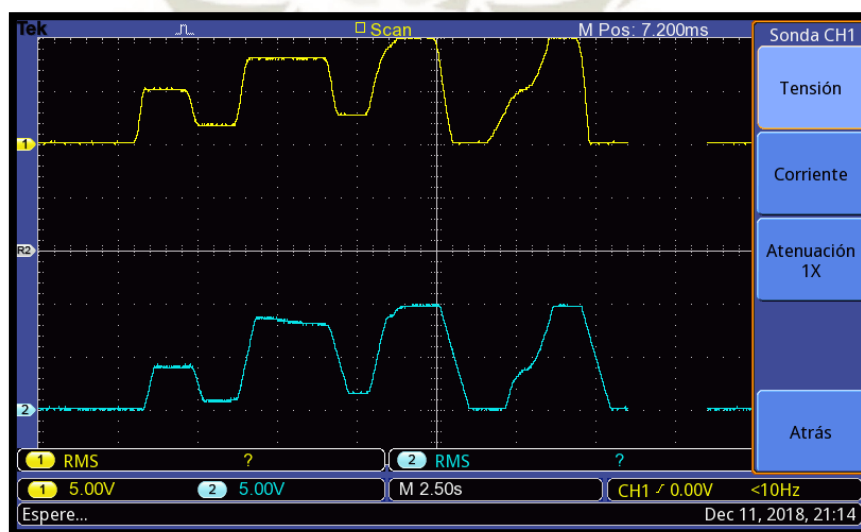
### 4.3.1. Sistema sin carga

Para demostración se realizó el modelamiento del sistema sin carga para poder compararlo con el sistema con carga, simulando una aplicación real.



**Figura 4.5.** Sistema implementado sin carga.  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se ve en la siguiente figura, para un cilindro sin carga se comporta como un seguidor con un pequeño delay en el seguimiento de trayectorias.

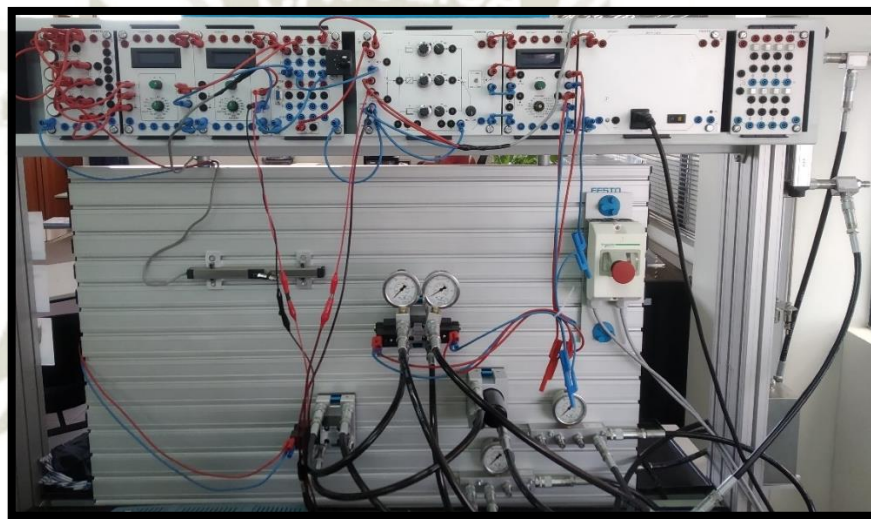


**Figura 4.6.** Resuestas a diferentes escalones.  
*Fuente: Elaboración Propia*

Se observa el sistema con un pequeño sobreimpulso, al estar sin carga el pistón se puede aceptar, pero para el siguiente análisis, no se tolerará.

#### 4.3.2. Sistema con carga

Para demostración se realizó el modelamiento del sistema sin carga para poder compararlo con el sistema con carga, simulando una aplicación real, en la que los sistemas hidráulicos siempre están siendo usados para mover grandes masas debido al buen torque que poseen.

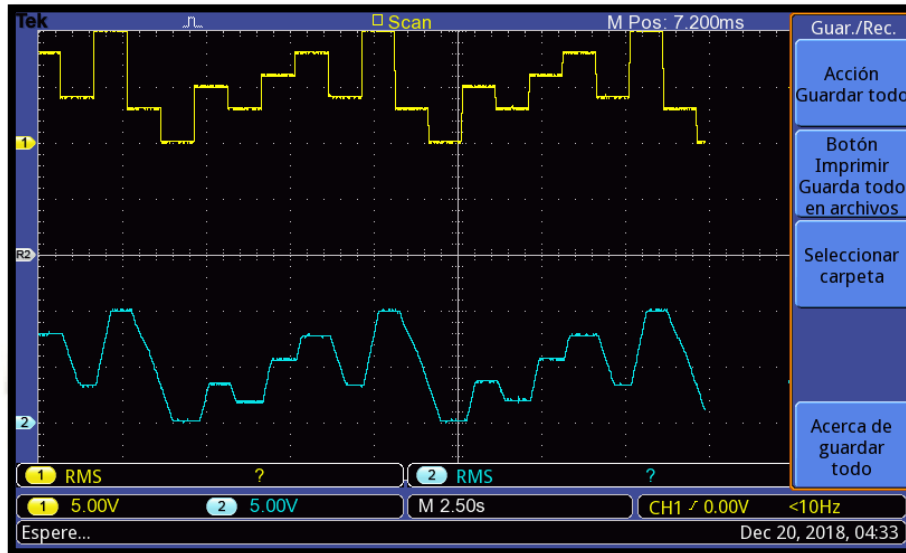


**Figura 4.7.** Montaje del sistema con el cilindro en posición vertical  
*Fuente: Elaboración Propia*

Colocaremos los parámetros moviendo las correspondientes perillas del Regulador PID, obtenidos gracias a la obtención de las ganancias  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$ , mediante el método de Ziegler-Nichols.

Una vez hecho esto el sistema está listo para recibir las señales de entrada en voltaje que serán usadas como Set-Point, todo ello se verá en el osciloscopio.

Se probó el comportamiento del sistema dándole una trayectoria de una señal cuadrada fijada por la Tarjeta de valor de consigna, teniendo los siguientes resultados:



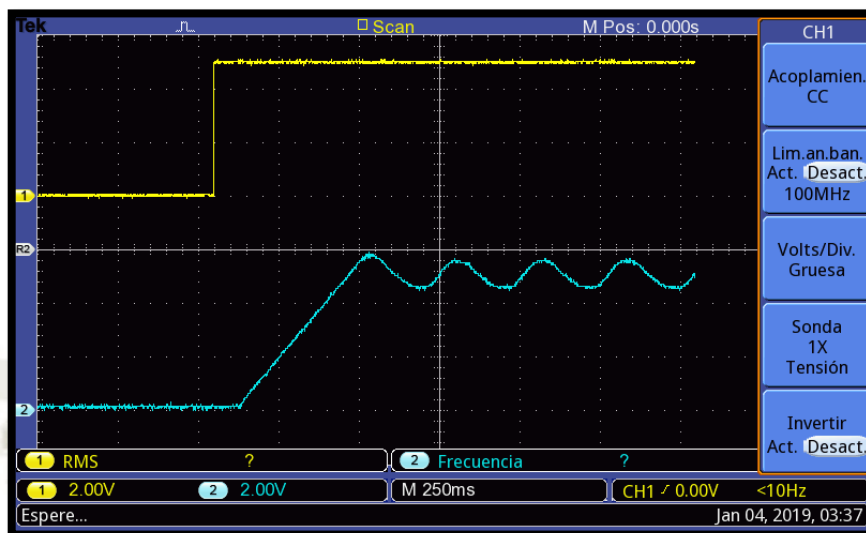
**Figura 4.8.** Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP  
*Fuente: Elaboración Propia*

Además, también se comprobó empíricamente los valores obtenidos mediante el Ziegler Nichols aplicado a la planta física siguiendo el método de oscilaciones en lazo cerrado:



**Figura 4.9.** Ajuste de los parámetros  
*Fuente: Elaboración Propia*

Se encontró empíricamente el valor del  $K_p$  crítico, llamado  $K_c$  para este caso es **17**, entonces de la data adquirida hallamos el Periodo crítico  $P_c$ , siendo esta 255 ms o **0.255** segundos.



**Figura 4.10.** Gráficas que muestran como el pistón sigue la trayectoria para diferentes SP  
*Fuente: Elaboración Propia*

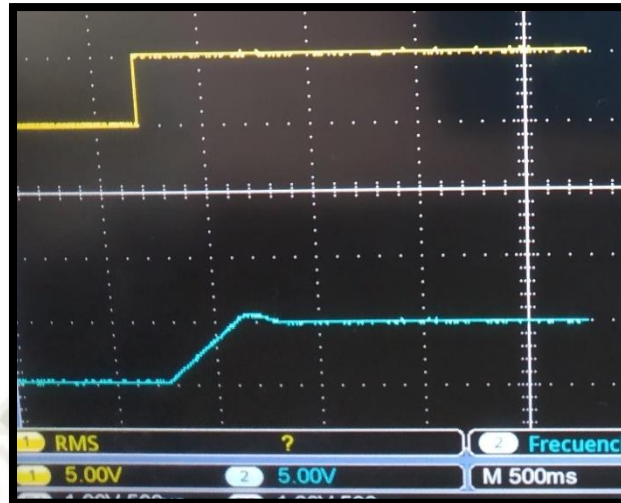
Entonces hallando los parámetros PID de acuerdo a la Tabla propuesta por Ziegler y Nichols tenemos:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.50 * K_c = 8.5$	----	
PI	$0.45 * K_c = 7.65$	$P_c / 1.2 = 0.2125$	----
PID	$0.60 * K_c = 10.2$	$0.5 * P_c = 0.1275$	$P_c / 8 = 0.03188$

Haciendo los cálculos respectivos, los parámetros para los controladores serán:

- Aplicando Z-N para implementar un Controlador P

$$K_p = 8.5$$



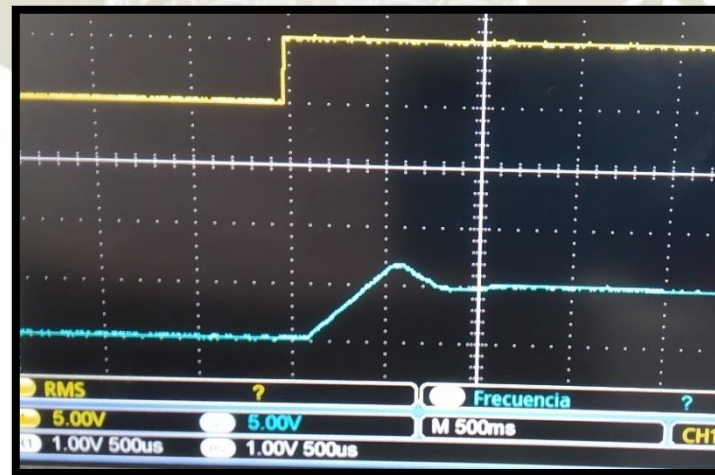
**Figura 4.11.** Respuesta del sistema al aplicarle el controlador P

*Fuente: Elaboración Propia*

- Aplicando Z-N para implementar un Controlador PI

$$K_p = 7.65; Tr = 0.2125;$$

$$K_i = \frac{K_p}{Tr}; \quad K_i = 36$$



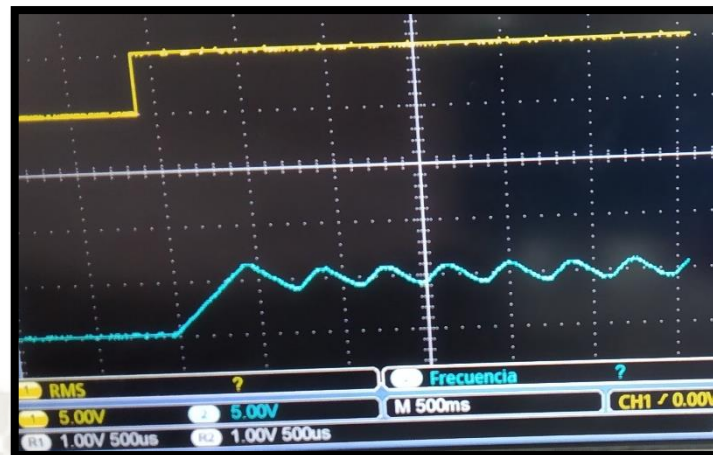
**Figura 4.12.** Respuesta del sistema al aplicarle el controlador PI

*Fuente: Elaboración Propia*

- Aplicando Z-N para implementar un Controlador PID

$$K_p = 10.2 \quad Tr = 0.1275 \quad K_i = 11.25/0.125 = 90$$

$$Td = 0.03188 \quad K_d = 10.2 \times 0.03188 = 0.324$$

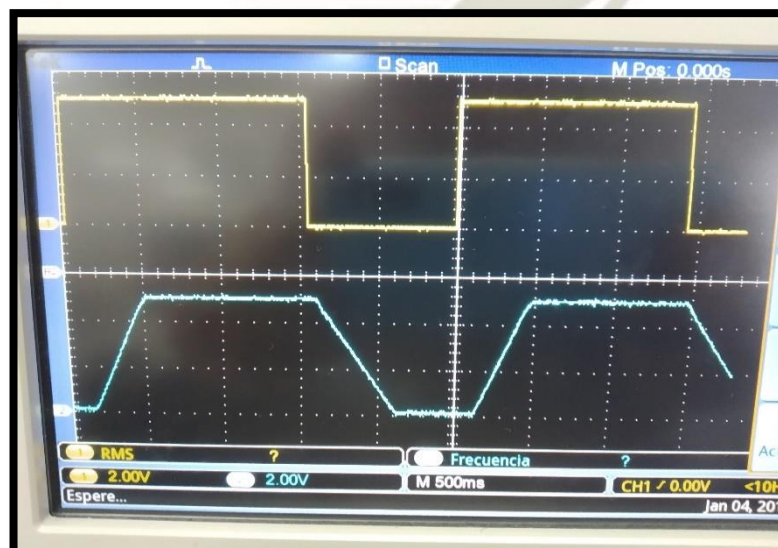


**Figura 4.13.** Respuesta del sistema al aplicarle el controlador PID  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se observa, el método de Ziegler- Nichols no es concluyente al establecer los parámetros del controlador, pero nos sirve como punto de partida.

### Implementando los valores de $K_p$ y $K_i$ hallados por el LGR

Haciendo las pruebas correspondientes y ya puliendo la sintonización un poco de manera manual, recordando que la exactitud del modelo es del 87%, obtenemos el siguiente resultado que es justo como lo necesitábamos, la visualización se da con ayuda del osciloscopio, con  $K_p=2.2$  y  $K_i=1.7$



**Figura 4.14.** Respuesta del sistema a escalón de 5 volt  
*Fuente: Elaboración Propia*

Se probará el sistema a distintos SP y rampas

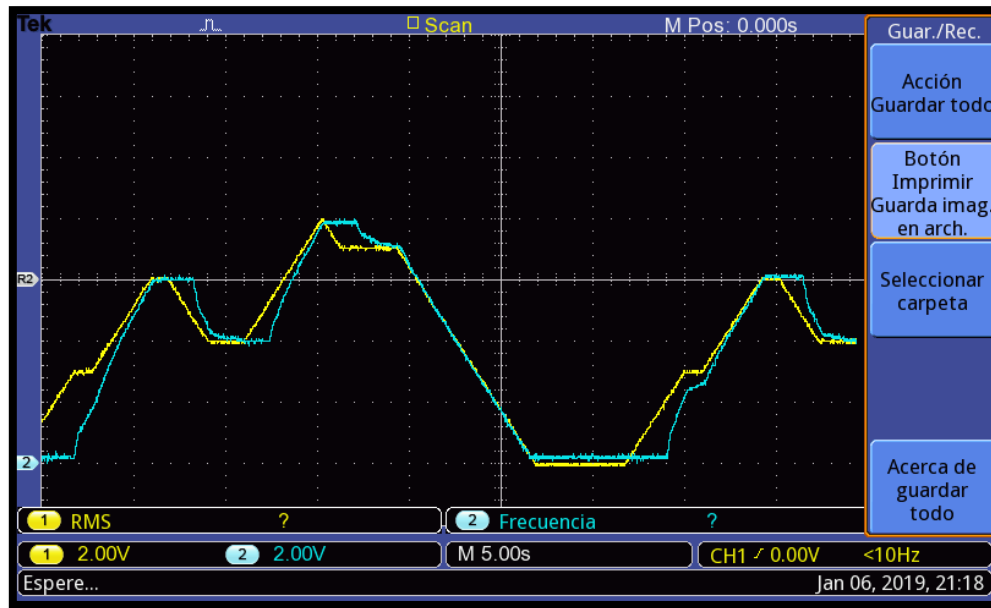


Figura 4.15. Respuesta del sistema a rampas de 1 volt/seg

Fuente: Elaboración Propia

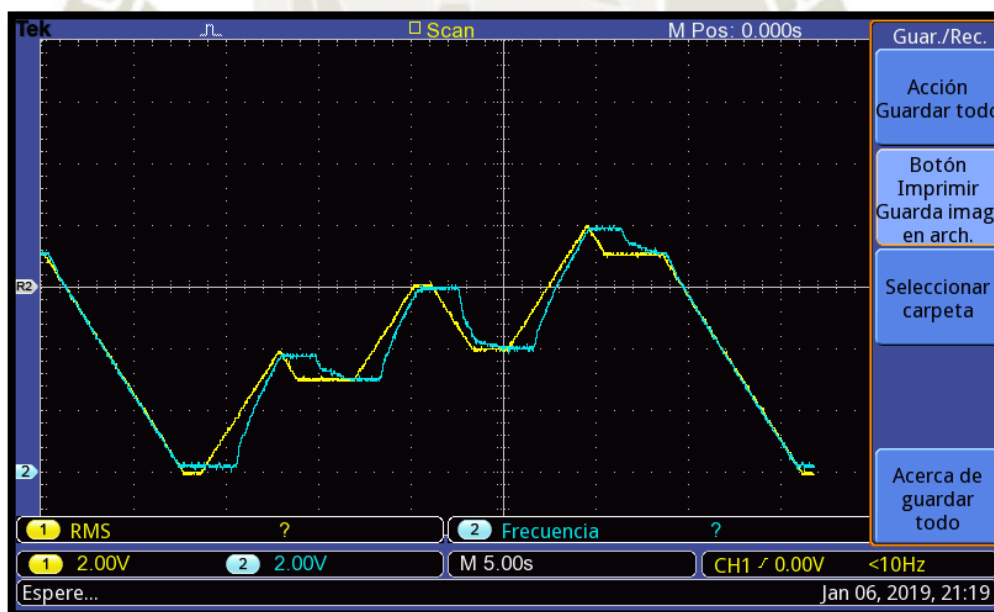
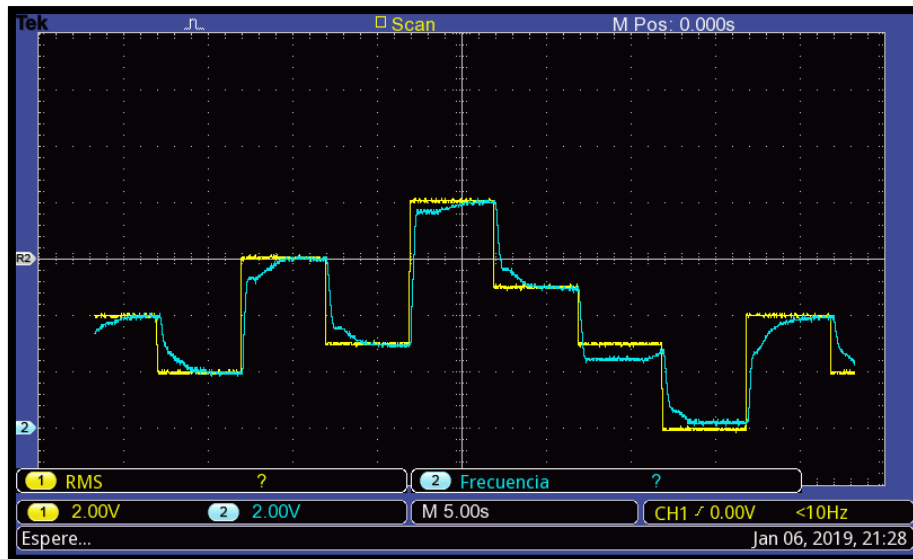


Figura 4.16. Respuesta del sistema a rampas de 1 volt/seg

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 4.17.** Respuesta del sistema a distintos escalones  
*Fuente: Elaboración Propia*



**Figura 4.18.** Respuesta del sistema a set points aleatorios hechos con el Slider  
*Fuente: Elaboración Propia*

Como se puede observar, el sistema sigue las trayectorias fijadas, se priorizó que el sistema no presente sobreimpulsos por sobre el tiempo de establecimiento, que tampoco es muy alto para sistemas hidráulicos, ya que si el sistema se hace más rápido, este presenta sobreimpulsos mayores al 20% sobretodo en carreras largas (de más de 10 cm).

## CONCLUSIONES

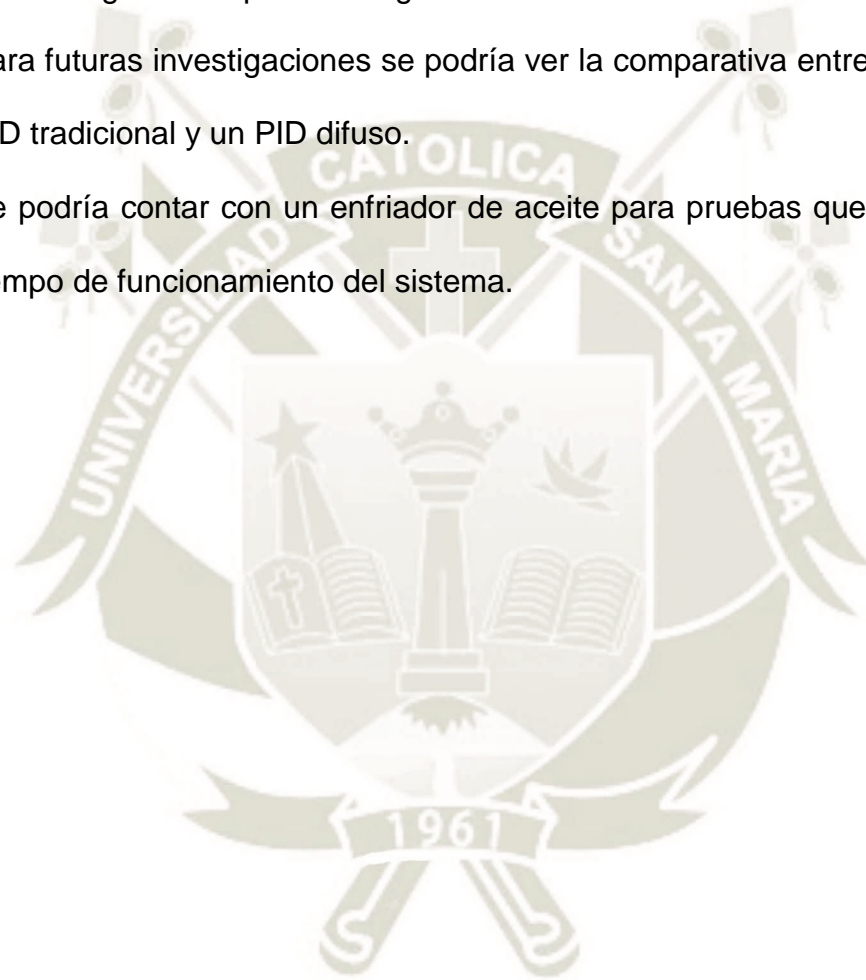
- Se diseñó los parámetros del controlador; al ser un sistema hidráulico, el sistema no puede presentar oscilaciones, ya que al ejercer grandes fuerzas y estar siempre sometido a un trabajo desplazando masas, puede ocasionar daños; pero si posicionarse en el menor tiempo posible.
- Se implementó y se puso en funcionamiento los elementos hidráulicos y electrónicos en conjunto para lograr controlar la posición del vástago.
- Se sintonizó partiendo por el método propuesto por Ziegler y Nichols, pero este no fue lo suficientemente exacto para las especificaciones, por esto es que se usó la herramienta Sisotool, por eso se le tuvo que dar un ajuste manual más fino. Se desarrolló un controlador analógico tipo PI para los sistemas y, viendo que cumple con el objetivo propuesto, obteniendo buenos resultados frente a diferentes señales de referencia; sin embargo, se observó que siempre persiste un error y este puede llegar a ser muy cercano a cero pero nunca cero.
- Se demostró la utilidad y las ventajas del software Matlab para obtener modelos desde la identificación de sistemas Black Box y a través de la identificación mediante el algoritmo Hammerstein-Wiener, logró muchos mejores resultados a los modelos polinomiales que representan comportamientos en sistemas LTI.

## OBSERVACIONES

- Al tener un sistema cuyo comportamiento y modelamiento son poco conocidos, se tuvo que simular y adquirir datos varias veces para interpretarlos mediante el software MATLAB.
- El montaje y prueba de características de los sensores fue una de las partes más importantes para poder llevar a cabo el muestreo de data.
- En este proyecto no se estudiaron a fondo las demás no linealidades inherentes al sistema, y se tomó como mayor fuente de no-linealidad la zona muerta presente en las válvulas proporcionales.
- El comportamiento del sistema varía un poco de acuerdo a la temperatura y viscosidad del aceite, y otras no linealidades, a los minutos de estar funcionando la bomba, se pierde un poco de exactitud en el alcance de las trayectorias fijadas, esto se debe a que se calientan los solenoides de la válvula.

## RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones referentes al tema, será necesario contar con mayor diversidad de cilindros y transductores lineales
- Para próximas investigaciones en el campo de la hidráulica debería contarse con un regulador triple o un regulador de estados.
- Para futuras investigaciones se podría ver la comparativa entre un controlador PID tradicional y un PID difuso.
- Se podría contar con un enfriador de aceite para pruebas que requieran mas tiempo de funcionamiento del sistema.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro. (2003). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos. Obtenido de [www.researchgate.net/publication/260058488\\_METODOS\\_DE\\_SINTONIZACION\\_DE\\_CONTROLADORES\\_PID\\_QUE\\_OPERAN\\_COMO\\_SERVOMEKANISMOS](http://www.researchgate.net/publication/260058488_METODOS_DE_SINTONIZACION_DE_CONTROLADORES_PID_QUE_OPERAN_COMO_SERVOMEKANISMOS)
- Alves, A., Lemos, M., S. Kridi , D., & Leal, K. (2018). *Github*. Obtenido de Github: <https://github.com/zerokol/eFLL>
- Andrew, N. (2015). *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer.
- Baygola, Figueroa (2009). Identificación robusta de Modelos Wiener y Hammerstein Obtenido de <http://www.revista-riai.org>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Mc Graw-Hill.
- Córdova, O. (2011). Métodos de Inferencia. Obtenido de <https://prezi.com/5jju05ocq5xr/metodos-de-inferencia/>
- Creuss, Solé. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Alfaomega.
- Creuss, Solé. (2011). *Instrumentación Industrial*, 8va Edición, Alfaomega.
- Festo Didactics. (1996). *Hidráulica Proporcional Nivel Básico*.
- Festo Didactics. (1995). *Hidráulica en Bucle cerrado TP-511. Manual de trabajo*
- Fuentes, Manuel. *Modelado y Control Robusto de un Cilindro Neumático*, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, Madrid, 2009.
- Gomez. (2010). *Identificación de Sistemas No Lineales*

- ISC, I. M. (2011). *Matemáticas Discretas*. Obtenido de Proposiciones compuestas (Disyunción, Conjunción, Negación, Condicional, Bicondicional) : <https://matedisunidad3.wordpress.com/category/3-1-2-proposiciones-compuestas-disyuncion-conjuncion-negacion-condicional-bicondicional/>
- Mannesmann Rexroth. (2010). Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas. Training Hidráulico Compendio 2  
Obtenido de <http://www.scrib.com>
- Mathworks (2018) Que son los sistemas Hammerstein Wiener. Obtenido de <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-hammerstein-wiener-models.html>
- Naylamp Mechatronics* . (2017). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/>
- Ogata, K. (s.f.). *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052011000300002](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052011000300002)
- Roca. (1999). *Oleohidráulica Básica y Diseño de Circuitos*.
- Shenzhen Miran Technology Co., Ltd, 2018
- Vickers. (1990). Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada. Obtenido de <http://www.scrib.com>

# ANEXOS

**ANEXO 01:** REGULADOR PID

**ANEXO 02:** AMPLIFICADOR DE 2 CANALES

**ANEXO 03:** TARJETA DE VALOR DE CONSIGNA

**ANEXO 04:** VÁLVULA PROPORCIONAL DE 4/3 VIAS

**ANEXO 05:** CILINDRO HIDRÁULICO

**ANEXO 06:** POTNECIOMETRO LINEAL

**ANEXO 06:** SLIDER

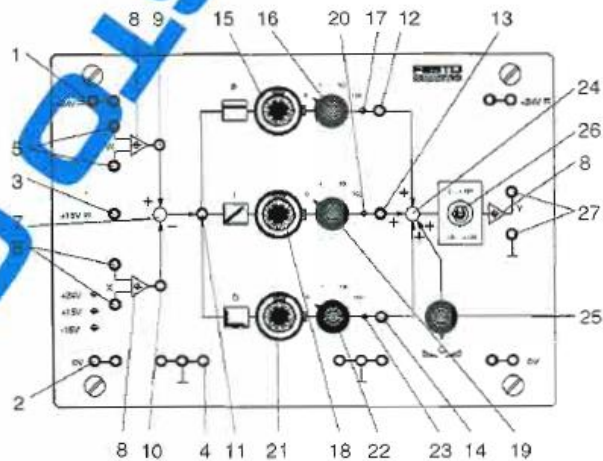
**ANEXO 06:** GUIAS DE PRÁCTICAS

## ANEXO 01: REGULADOR PID



### Claves de las conexiones

- 1 Alimentación: + 24 V
- 2 Tierra de la alimentación: 0 V
- 3 Alimentación del sensor: + 15 V
- 4 Tierra del sensor o tierra analógico
- 5 Entrada de punto de consigna diferencial
- 6 Entrad del valor real diferencial
- 7 Comparador
- 8 Indicador de sobremodulación
- 9 Zócalo de test: Punto de consigna
- 10 Zócalo de test: Valor real
- 11 Zócalo de test: Desviación del sistema
- 12 Zócalo de test: Ganancia proporcional
- 13 Zócalo de test: Ganancia integral
- 14 Zócalo de test: Ganancia diferencial
- 15 Potenciómetro rotativo: componente P
- 16 Interruptor rotativo: componente P
- 17 Indicador de conectado: componente P
- 18 Potenciómetro rotativo: componente I
- 19 Interruptor rotativo: componente I
- 20 Indicador de conectado: componente I
- 21 Potenciómetro rotativo: componente D
- 22 Interruptor rotativo: componente D
- 23 Indicador de conectado: componente D
- 24 Punto sumador
- 25 Potenciómetro rotativo para el offset de la variable de corrección
- 26 Interruptor selector de rango
- 27 Salida de la variable de corrección



### Diseño

El regulador PID se compone de las siguientes zonas:

- Alimentación
- Entradas diferenciales
- Comparador
- Componentes de regulador:
  - Componente proporcional
  - Componente integral
  - Componente diferencial
- Offset de la variable de corrección
- Punto sumador
- Limitador
- Salida

**Función**

Este regulador PID puede utilizarse, entre otras cosas, como un regulador para circuitos de hidráulica y neumática en bucle cerrado.

**Alimentación:** El regulador PID requiere una alimentación de 24 V. Esta tensión se convierte internamente a +/- 15 V y alimenta la electrónica del regulador. Las tensiones se hallan eléctricamente aisladas unas de otras, es decir, la tarjeta del controlador tiene dos potenciales cero (el tierra analógico y el tierra de la alimentación (0 V)).



*El tierra analógico y el tierra de la alimentación nunca deben unirse, ya que ello puede causar interferencias en las señales. Los 15 V deben utilizarse junto con el tierra analógico como alimentación de los sensores para asegurar que las señales de ruido se mantienen a valores mínimos.*

**Entradas diferenciales:** En cada caso, el regulador PID está provisto de una entrada diferencial para las señales del punto de consigna y del valor real. La señal diferencial puede medirse con referencia al tierra analógico.

Las entradas diferenciales están montadas con filtros pasa-bajos para eliminar las interferencias.

La sobremodulación por debajo de -10 V o por encima de +10 V se indica por LEDs.

**Comparador:** El comparador se conecta en serie con las señales de entrada y calcula la desviación del sistema entre el punto de consigna y el valor real.

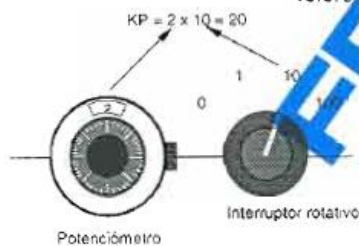
**Componentes del regulador:** Los tres componentes del regulador (P, I, y D) pueden conectarse y desconectarse separadamente, permitiendo utilizar diferentes combinaciones. Los parámetros individuales del regulador se ajustan con la ayuda de potenciómetros e interruptores rotativos.

**Offset de la variable de corrección:** El offset de la variable de corrección puede utilizarse para sobreponer tensiones constantes en la señal de salida para, por ejemplo, compensar el desplazamiento del punto cero de los actuadores.

**Limitador de la variable de corrección:** El limitador de la variable de corrección convierte las señales del regulador al rango de trabajo requerido por los actuadores. Cualquier sobremodulación de la señal de salida se indica por un LED.

**Salida:** La variable de corrección puede evaluarse con referencia al tierra analógico de la salida.

**Zócalo de test:** Varios zócalos de test permiten medir la tensión de las señales con referencia al tierra analógico.



**Ajuste de los coeficientes**

Los coeficientes KP, KI y KD de los componentes del regulador son el producto de los valores ajustados en el potenciómetro rotativo y el interruptor rotativo.

Alimentación	+ 24 V +/-10%
Indicador de sobremodulación	-10 V > Ue > + 10 V
Margen de tensión de entrada	-13V...+13V
Coefficiente proporcional KP	0...1000
Coefficiente integral KI	0...1000 1/s
Coefficiente diferencial KD	0...1000ms
Limitación de tensión de salida	[0...+10V] [-10V...+10V]
Offset de la variable de corrección	5 V +/- 3,5 V con [0...+10V] 0 V +/- 7 V con [-10V...+10V]

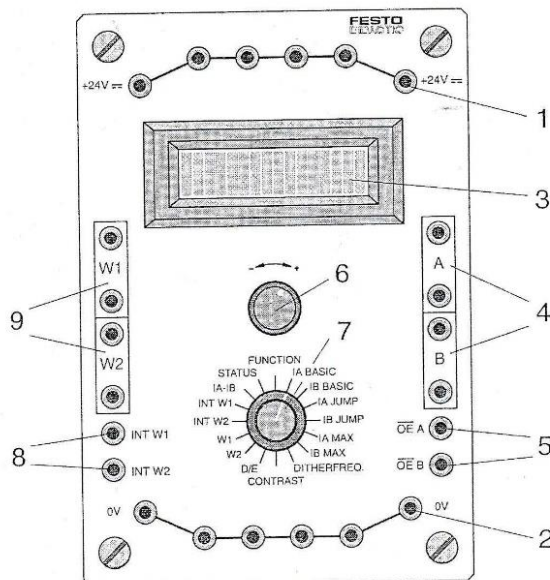
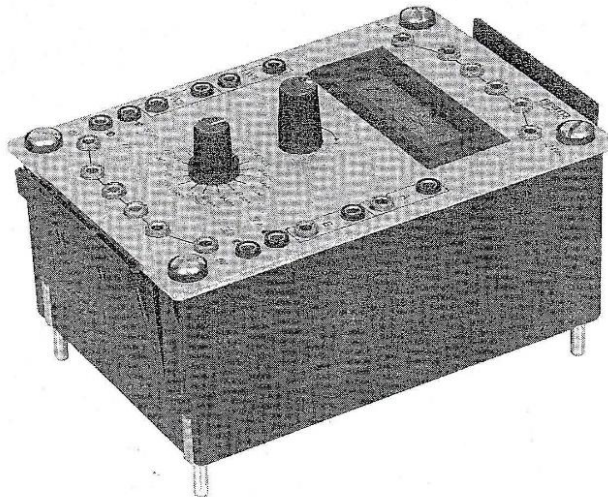
Datos técnicos

## ANEXO 02: AMPLIFICADOR DE 2 CANALES

Amplificador de 2 canales

151498

1/6



Vista frontal

### Elementos de control

- |   |  |
|---|--|
| 1 Tensión de alimentación 24 V DC                   | 6 Pomo giratorio                             |
| 2 Tensión de alimentación 0 V DC                    | 7 Interruptor selector                       |
| 3 Display   | 8 Valores de consigna internos               |
| 4 Salidas A y B                                     | 9 Entradas para valores de consigna externos |
| 5 Habilitación de las salidas A y B (output enable) |  |

151498

Amplificador de 2 canales

2/6

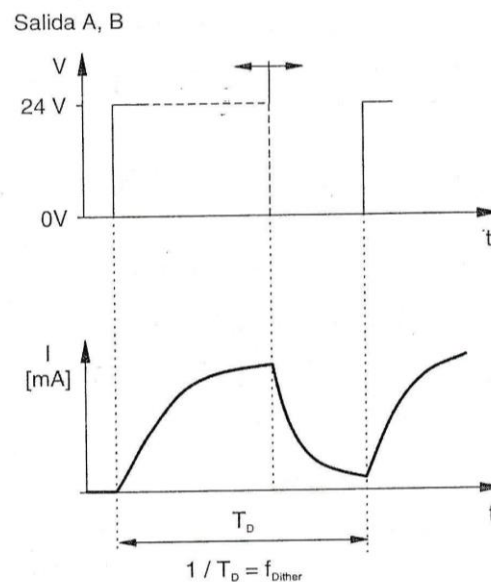
**Diseño**

La tarjeta del amplificador proporcional está alojada dentro de una pequeña unidad electrónica. Las conexiones eléctricas se realizan en forma de zócalos de 4 mm. La unidad se monta en el bastidor del armario de la mesa de prácticas o en la placa perfilada por medio de cuatro clavijas adaptadoras.

**Función**

La tarjeta amplificadora se utiliza para el accionamiento de válvulas proporcionales. El amplificador está diseñado de forma tal que puede activar o bien dos solenoides independientes (1 canal) o una válvula con dos solenoides (2 canales), p.ej. una válvula proporcional de 4/3 vías. La tarjeta funciona opcionalmente de la misma forma como dos amplificadores de 1 canal o como amplificador de dos canales.

Para ello, los valores de consigna (/señales de tensión) se convierten en la corriente de magnetización necesaria para las válvulas proporcionales. Esta tarea se realiza en dos etapas finales de modulación del ancho de pulso. La función de las etapas finales puede compararse a la de un interruptor. Este se conecta y se desconecta por periodos de tiempo determinados. La suma total de los dos periodos es siempre la misma. La relación entre los periodos de conexión (ON) y los de desconexión (OFF) cambia en relación con el valor de consigna. El interruptor puede estar desconectado todo el periodo. Cuanto más tiempo se halle en ON, más corriente circulará a través del solenoide proporcional. En el solenoide, la corriente sube de acuerdo a la curva de carga de la bobina hasta el valor máximo especificado por la tensión aplicada y la resistencia óhmica, o limitada por el tiempo. Cuando se conmuta a OFF, la corriente cae según la curva de descarga. Esto produce una forma de onda de la corriente similar a un diente de sierra



Flujo de la corriente

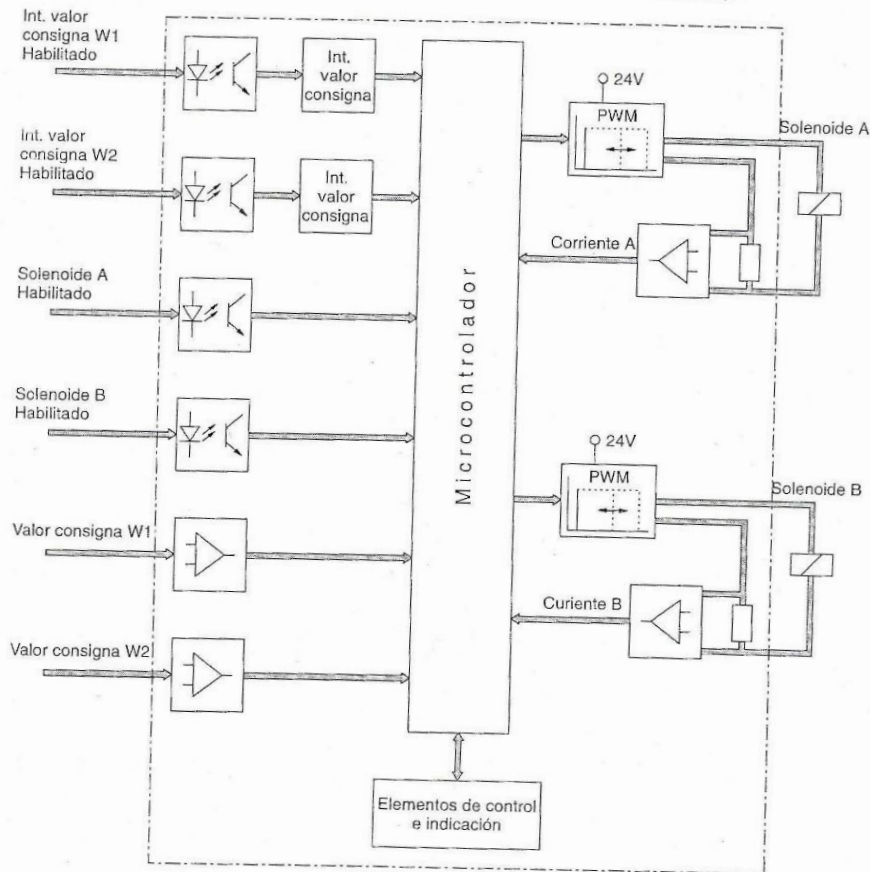
*Amplificador de 2 canales*

151498

3/6

Ya que la resistencia de la bobina del solenoide proporcional cambia con la temperatura, la corriente está controlada. Para ello, la corriente se conduce a través de una resistencia de pequeño valor óhmico. La caída de tensión a través de esta resistencia se conduce hacia el controlador de corriente. Las etapas finales están montadas con un fusible automático contra sobrecargas.

Diagrama de bloques



151498

*Amplificador de 2 canales*

4/6

### **Ajustes**

Todas las entradas se realizan por medio de un interruptor selector y un pomo giratorio en la parte frontal de la tarjeta. El almacenamiento se realiza posteriormente accionando el interruptor selector. Los datos variables se muestran en el display y están asegurados ante un fallo de tensión.

FUNCTION	Dos aplicadores de 1 canal o uno de dos canales
IA BASIC, IB BASIC	Corriente básica para la salida A, B
IA JUMP, IB JUMP	Corriente de salto para la salida A, B
IA MAX, IB MAX	Corriente máxima para la salida A, B
DITHERFREQ.	Frecuencia Dither
CONTRAST	Contraste de la pantalla
G/E	Opciones de idioma: Alemán, Inglés
INT W1, INT W2	Valor de consigna interno W1, W2
W1, W2	Indicación del valor de consigna externo W1, W2
IA, IB	Indicación de la corriente de magnetización en la salida A, B

Los valores de consigna pueden especificarse interna o externamente. Los valores de consigna internos se activan por medio de las entradas INT W1 e INT W2. El estado activo se visualiza por medio de LEDs junto a las entradas.

### **Corriente de magnetización**

Hay tres corrientes de magnetización diferentes. La corriente básica, la corriente de salto y la corriente dependiente del valor de consigna.

La corriente básica depende del ajuste de I Basic y no del valor de consigna.

La corriente de salto depende de la polaridad del valor de consigna. En lo que se refiere al amplificador de 2 canales, esto significa que un cambio del valor de consigna a positivo conduce a la salida A a un cambio brusco en la corriente por el valor ajustado. Consecuentemente, un cambio del valor de consigna a negativo produce una corriente de salto en el canal B. El nivel del valor de consigna no tiene efecto alguno en el valor de la corriente de salto.

La correlación entre el valor de consigna y la corriente de magnetización depende de varios factores. Estos factores son la corriente máxima I Max, la corriente en reposo I Basic, la corriente de salto I Jump y el valor de consigna.

El valor de I max se refiere al valor de consigna de 10 V. Si no se ha ajustado una corriente básica y una corriente de salto, la amplificación (V) está en:

$$V = \frac{\text{Valor de I Max}}{10 V}$$

#### *Ejemplo*

$$I \text{ Max} = 800 \text{ mA}$$

$$V = \frac{800 \text{ mA}}{10 V} = 80 \text{ mA} / V$$

**Amplificador de 2 canales**

151498

5/6

Si se ha ajustado una corriente de salto o una corriente básica, la amplificación (V) se reduce. Sin embargo, la corriente máxima permanece al valor ajustado con I Max.

$$V = \frac{(I_{Max} - I_{Basic} - I_{Jump})}{10 V}$$

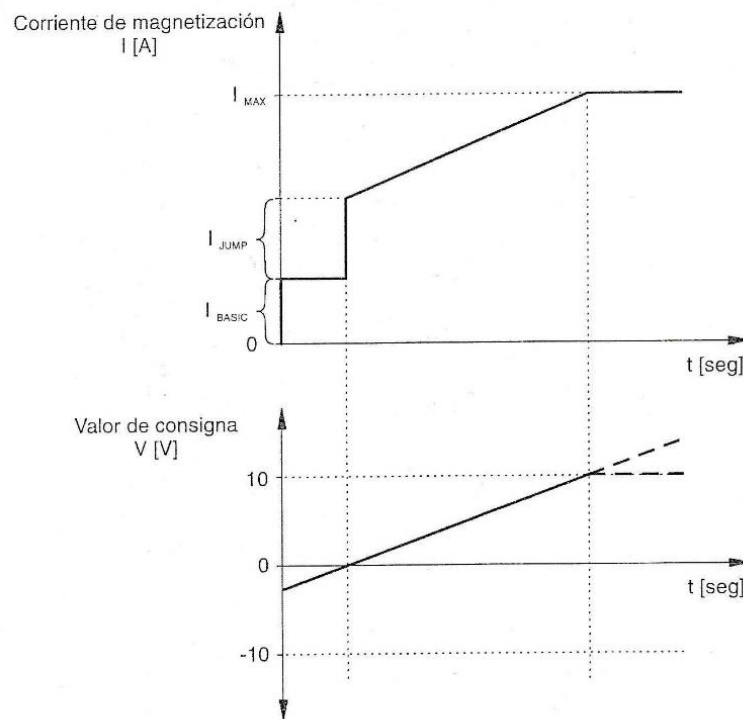
*Ejemplo*

$I_{Basic} = 100 \text{ mA}$

$I_{Jump} = 200 \text{ mA}$

$I_{Max} = 800 \text{ mA}$

$$V = \frac{(800 \text{ mA} - 100 \text{ mA} - 200 \text{ mA})}{10 V} = \frac{500 \text{ mA}}{10 V} = 50 \text{ mA} / V$$



Ajustes de la corriente de magnetización

Dado que la corriente en reposo y la corriente de salto no tiene que ser ajustada idénticamente en ambos canales, esto puede producir amplificaciones diferentes para el canal A y el canal B.

151498

*Amplificador de 2 canales*

6/6

Además, por medio de dos entradas de PLC puede conectarse una habilitación. Se dispone de una señal de habilitación para cada salida de solenoide A y B. Una salida se halla cerrada si se aplican 24 V DC en la entrada OE A o OE B. El estado se visualiza con LEDs junto a las entradas.

**Dither**

Para compensar el rozamiento estático de la corredera de la válvula, se superpone una señal de frecuencia en la corriente de magnetización. Esto se conoce como dither. Esta frecuencia es conocida al mismo tiempo como frecuencia pulsante para las etapas finales. El efecto del dither es mayor con frecuencias bajas. La elección de la frecuencia depende de la histéresis de la válvula accionada y del actuador, así como de las interferencias acústicas. La frecuencia ajustada se aplica a ambas salidas.

**Especificación del valor de consigna**

Los valores de consigna pueden especificarse externamente a través de dos entradas o internamente. Si se aplican 24 V DC a una entrada de control INT W1 o INT W2, se aplican los valores de consigna internos y el LED se ilumina. Para los valores de consigna W1 y W2 vale lo siguiente:

Amplificador de 1 canal:	Valor de consigna W1, 0 ... + 10 V	Salida A
	Valor de consigna R2, 0 ... + 10 V	Salida B
Amplificador de 2 canales:	Valor de consigna W1, 0 ... + 10 V	Salida A
	Valor de consigna W1, 0 ... + 10 V	Salida B
	Valor de consigna W2	no se tiene en cuenta

Tensión de alimentación	24 V DC $\pm$ 10 V, Rizado residual < 10 %
Valores de consigna	$\pm$ 10 V DC en pasos de 100 mV
Señal de conmutación para valor de consigna interno	15 .... 30 V DC
Salidas para solenoides	señal PWM, 24 V, max. 1 A
Señal de habilitación	15 ... 30 V DC
Corriente básica	0 ... 250 mA en pasos de 1 mA
Corriente de salto	0 ... 250 mA en pasos de 1 mA
Corriente máxima	100 mA ... 1 A en pasos de 5 mA
Frecuencia Dither	100 Hz ... 250 Hz en pasos de 1 Hz
Conexiones	para clavijas de 4 mm
Las entradas están protegidas ante cortocircuitos y sobrecargas hasta 24 V.	
<i>Sujeto a cambios</i>	

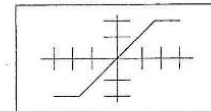
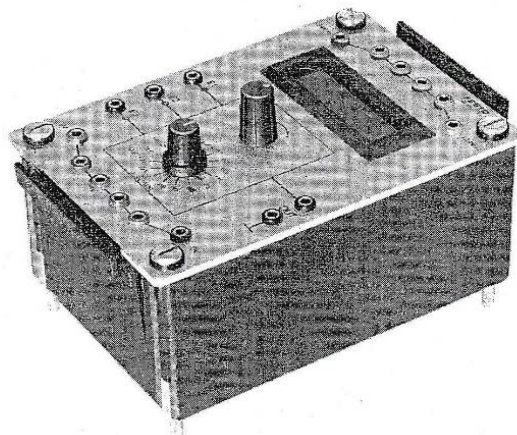
Datos técnicos

## ANEXO 03: TARJETA DE VALOR DE CONSIGNA

Tarjeta del valor de consigna

151489

1/4



### Elementos de control

- 1 Tensión de alimentación: 24 V DC
- 2 Tensión de alimentación: 0 V DC
- 3 Display
- 4 Pomo giratorio
- 5 Interruptor selector
- 6 + señal de consigna
- 7 - señal de consigna
- 8 Entrada binaria externa I1
- 9 LED
- 10 Entrada binaria externa I2
- 11 LED I2
- 12 Entrada binaria externa I3
- 13 LED I3

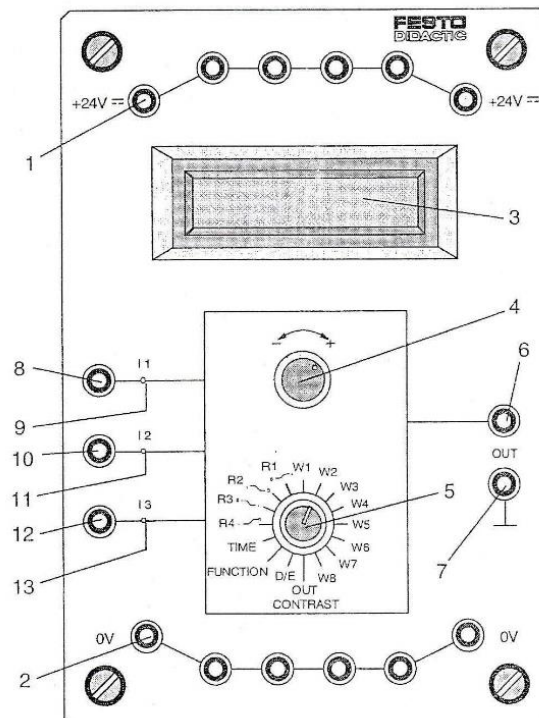
### Diseño

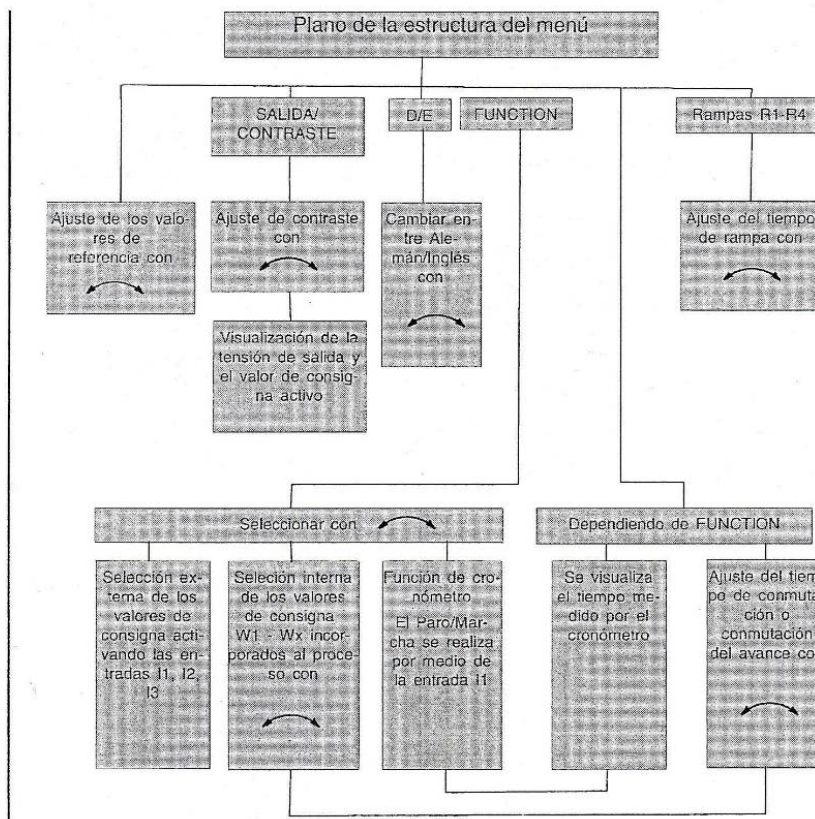
La tarjeta del valor de consigna está alojada en una pequeña unidad ER. Puede accederse a las señales y tensiones por medio de clavijas de 4 mm.

### Función

Las funciones de la tarjeta del valor de consigna son las siguientes:

- generación del valor de consigna programable
- generación de rampa programable
- secuencia cíclica de valores de consigna y rampas
- Cronómetro





Estructura del menú

**Almacenamiento**

Los valores ajustados se almacenan por medio de un posterior enclavamiento del interruptor selector.

**Cronómetro**

La función de cronómetro se selecciona por medio del elemento del menú "FUNCTION". El tiempo medido se visualiza bajo el elemento de menú "TIME". El cronómetro se pone en marcha y se detiene por medio de la activación de la entrada I1. El tiempo máximo que puede medir es 100 horas.

**Valores de consigna**

Pueden ajustarse hasta 8 valores de consigna en el margen de -10 V a +10 V. Estos pueden activarse interna o externamente.

La activación interna se realiza secuencialmente dentro del tiempo de inversión regulable (0,01...50 s). El tiempo de inversión es idéntico para todos los valores de consigna. Las entradas externas de control I1, I2 e I3 están inactivas.

Con tiempos de conmutación de menos de 0,01 s o más de 50,0 s, se selecciona el modo de funcionamiento "Advance switching setpoint values", con lo cual los valores de consigna seleccionados internamente W1...Wx son avanzados continuamente, una vez que el valor de consigna activado ha alcanzado su valor.

Tarjeta del valor de consigna

Tabla de bits de entrada			
I3	I2	I1	Valor de consigna
0	0	0	W1
0	0	1	W2
0	1	0	W3
0	1	1	W4
1	0	0	W5
1	0	1	W6
1	1	0	W7
1	1	1	W8

Tabla de bits

La activación externa se realiza en cualquier orden según la tabla de bits a través de la activación de las entradas I1, I2 e I3. El tiempo de inversión interno está inactivo.

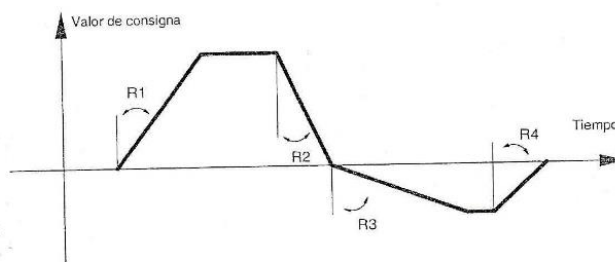
**Rampas**

Las rampas se establecen como parámetros de pendiente (segundos / Volt), es decir:

- valor bajo de rampa = gran pendiente
- valor alto de rampa = pequeña pendiente

Las rampas en los cuadrantes del sistema de coordenadas cartesianas están definidas como sigue:

1. Cuadrante: pendiente positiva de 0 V
2. Cuadrante: pendiente negativa hasta 0 V
3. Cuadrante: pendiente negativa de 0 V
4. Cuadrante: pendiente positiva hasta 0 V



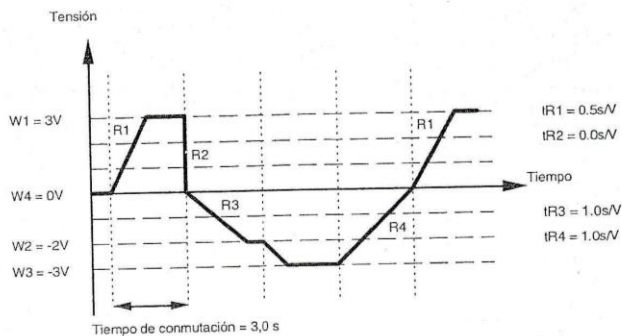
Tensión de alimentación 24 V DC +/- 10%	
Número de valores de consigna	8
Margen de tensión de salida	-10 V...+10 V Tol. ± 5 mV (regulable en pasos de 0,1 V)
Número de rampas	4
Tiempos de rampa	0...10,0 s / 1V (regulable en pasos de 50 ms / 1 V)
Tensión de activación de entradas	min. 15 V
Salida	1 kHz
Cronómetro	Entrada 1 tiempo de medición 0...100 hrs.
Conexiones	para clavija/jack de 4 mm
<i>Sujeto a cambios</i>	

Datos técnicos

151489

Tarjeta del valor de consigna

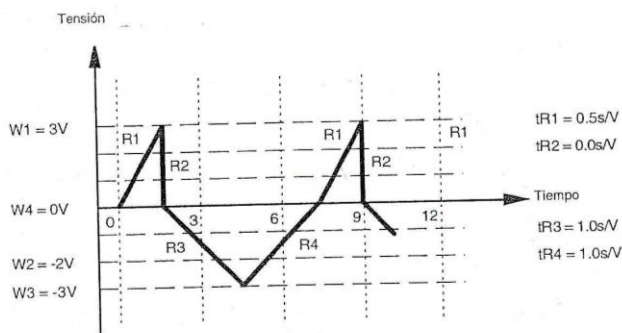
4/4



**Ejemplo 1**

Ajustes en la tarjeta del valor de consigna:

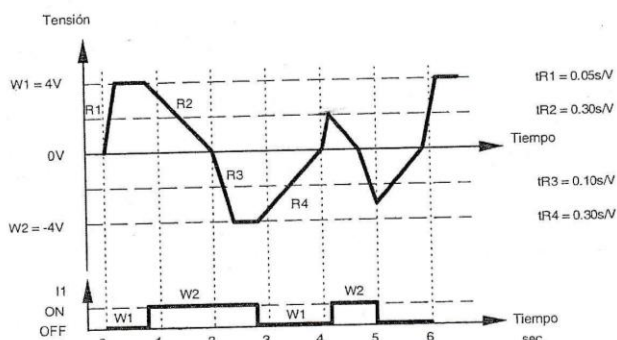
Función: Selección interna:  
 Valores de consigna 1-4  
 Tiempo: Tiempo de conmut.  $t = 3.0s$   
 Tiempos rampa:  $tR1 = 0,5s/V$   
 $tR2 = 0,0s/V$   
 $tR3 = 1,0s/V$   
 $tR4 = 1,0s/V$   
 Valores de consigna:  $W1 = 3,0V$   
 $W2 = -2,0V$   
 $W3 = -3,0V$   
 $W4 = 0,0V$



**Ejemplo 2**

Ajustes en la tarjeta del valor de consigna:

Tiempo : Avance de conmutación de los valores de consigna  
 Todos los demás ajustes idénticos al ejemplo 1.



**Ejemplo 3**

Activación externa a través de la entrada I1

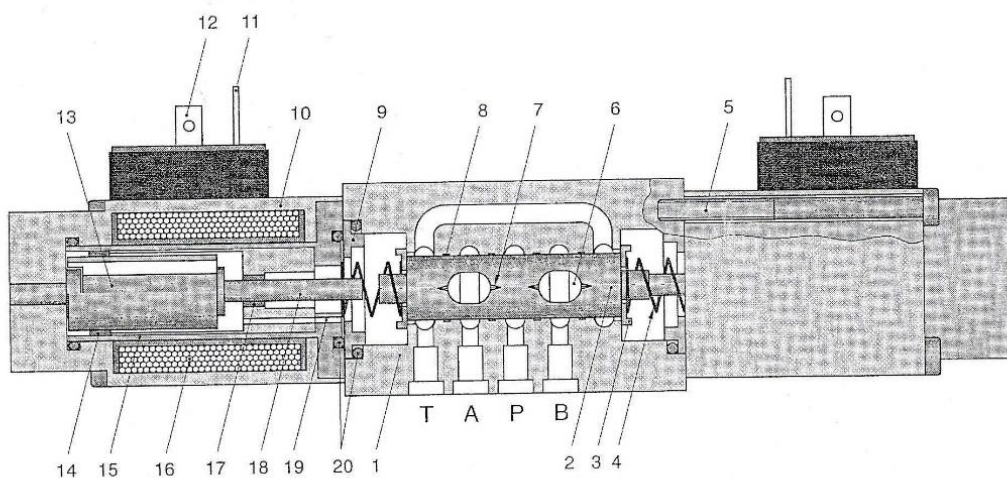
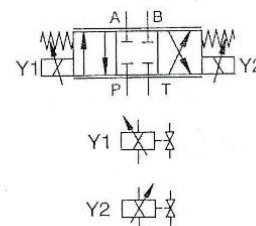
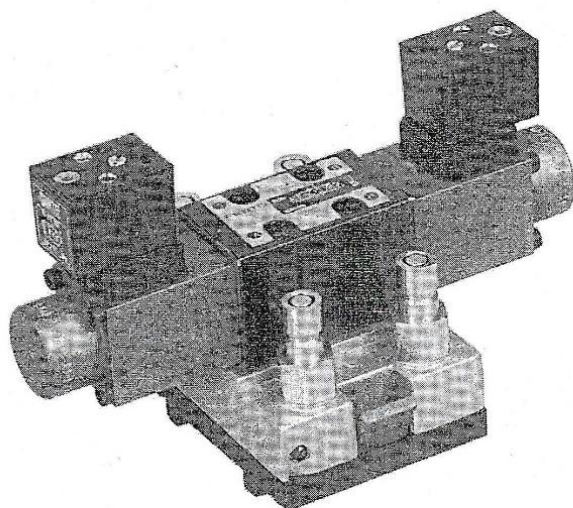
Función: Seleccionar valores de consigna con I1, I2, I3  
 Tiempos de rampa:  $tR1 = 0,05s/V$   
 $tR2 = 0,30s/V$   
 $tR3 = 0,10s/V$   
 $tR4 = 0,30s/V$   
 Valores de consigna:  $W1 = 4,0V$   
 $W2 = -4,0V$

## ANEXO 04: VÁLVULA PROPORCIONAL DE 4/3 VIAS

Válvula proporcional de 4/3 vías

159403

1/4



### Diseño

Esta válvula proporcional de 4/3 vías se halla montada en una placa base que incorpora racores de acoplamiento rápido. El dispositivo se fija sobre la placa perfilada por medio del sistema de dos levas azules (alternativa de montaje "A").

- |    |                                  |    |                                       |
|----|----------------------------------|----|---------------------------------------|
| 1  | Cuerpo de la válvula             | 11 | Pin de tierra                         |
| 2  | émbolo de la válvula             | 12 | Conexiones eléctricas del solenoide   |
| 3  | Disco de muelle                  | 13 | Núcleo de hierro dulce de la armadura |
| 4  | Muelle de centraje               | 14 | Cojinete de la armadura               |
| 5  | Tornillos de fijación            | 15 | Camisa de presión                     |
| 6  | Taladro del émbolo de la válvula | 16 | Bobina del solenoide                  |
| 7  | Muesca de control                | 17 | Cojinete de la leva                   |
| 8  | Ranura limitadora de presión     | 18 | Leva                                  |
| 9  | Disco                            | 19 | Conducto de compensación              |
| 10 | Cuerpo del solenoide             | 20 | Juntas                                |

159403

Válvula proporcional de 4/3 vías

2/4

**Función**

La vista en sección representa la posición media. El émbolo de la válvula (2) es accionado directamente por medio de los solenoides proporcionales. El émbolo de la válvula es mantenido en posición media por dos muelles (4), si ambos solenoides están desexcitados. El accionamiento eléctrico de un solenoide desarrolla una fuerza que hace desplazarse a la leva. Esta fuerza se transfiere al émbolo de la válvula por medio de la leva produciendo el movimiento de émbolo de la válvula hacia el lado opuesto (4). La fuerza del solenoide es proporcional a la corriente eléctrica. Junto con la presión del muelle, se establece un equilibrio de fuerzas correspondiente a la curva característica del muelle. Cuanto mayor es la corriente de magnetización, mayor es la desviación del émbolo.

Si se excita el solenoide Y, ello produce una circulación de P hacia A y de B hacia T. Si es el solenoide Y2 es que se excita, ello produce una circulación desde P hacia B y desde A hacia T.

El caudal, que puede ser controlado a través del émbolo de la válvula, depende de:

**■ La abertura de la estrangulación**

Durante el recorrido del émbolo de la válvula, se produce una apertura de P a A y de B a T, o de P a B y de A a T. Estas aberturas se forman por las ranuras de control (7) y se conocen como bordes de control. El tamaño de la abertura de estrangulación depende de la distancia recorrida por el émbolo de la válvula. La forma de la ranura de control también influye las características del caudal. Una ranura en V produce un caudal progresivo. (Una ranura rectangular produciría un caudal lineal).

**■ La presión diferencial**

Cuanto mayor es la presión diferencial a través de los bordes de control, mayor es el caudal.

**■ La viscosidad del medio (tipo de aceite y temperatura).****Nota**

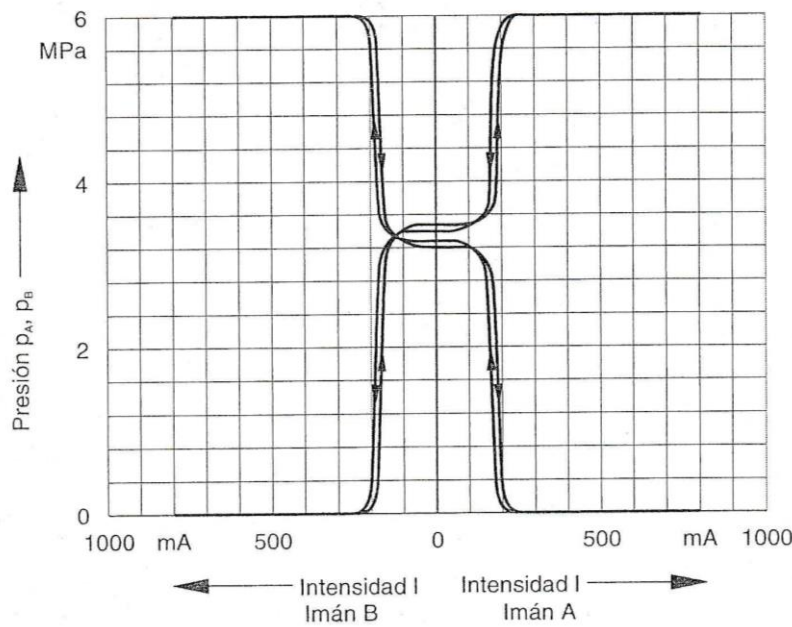
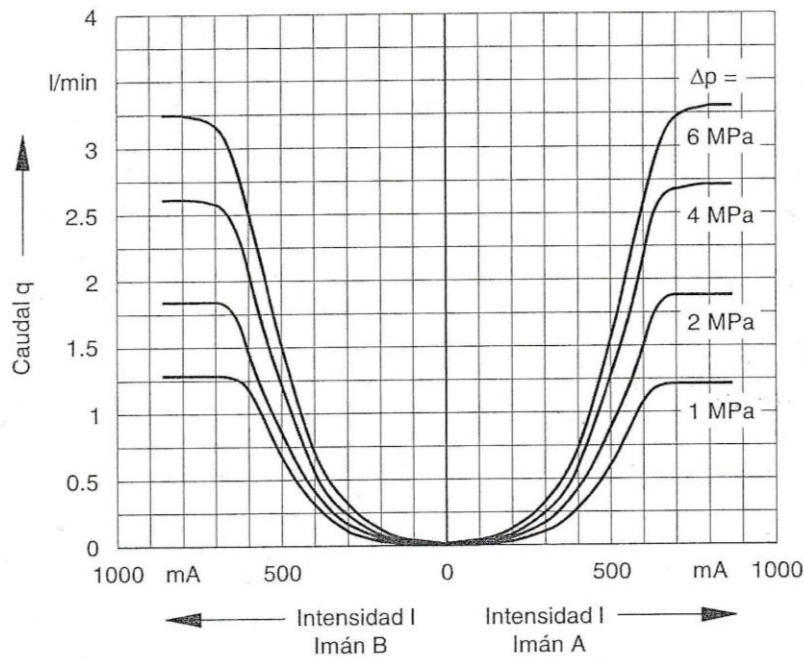
Las conexiones eléctricas están protegidas contra sobretensión. El estado de conmutación viene indicado por un LED.



Válvula proporcional de 4/3 vías

159403

3/4



159403

Válvula proporcional de 4/3 vías

4/4

Diseño de la válvula	Válvula de corredera accionada directamente
Accionamiento	Solenoide proporcional a compresión
Distribución de taladros	ISO/DIN 4401 Tamaño 02
Medio	Aceite mineral, viscosidad 22 cSt (mm <sup>2</sup> /s)
Grado de filtración	10 μm
Temperatura máxima del aceite	70 °C
Presión máx. de funcionamiento P <sub>max</sub> , estática	120 bar (12 MPa)
Caudal nominal q <sub>N</sub>	1,5 l/min a Δp <sub>N</sub> = 5 bar / Borde de control
Caudal de fuga de aceite q <sub>L</sub>	< 0,01 l/min a 60 bar
Tensión nominal	24 V DC
Intensidad nominal	680 mA
Resolución	< 1 mA
Tiempo de ajuste del salto de señal 0 ... 100 %	< 60 ms
Precisión de repetibilidad	< 1 %
Conexión eléctrica	para clavijas de 4 mm , 3,5 mm
Conexión hidráulica	para 4 zócalos de acoplamiento rápido
<i>Sujeto a cambios</i>	

Datos técnicos

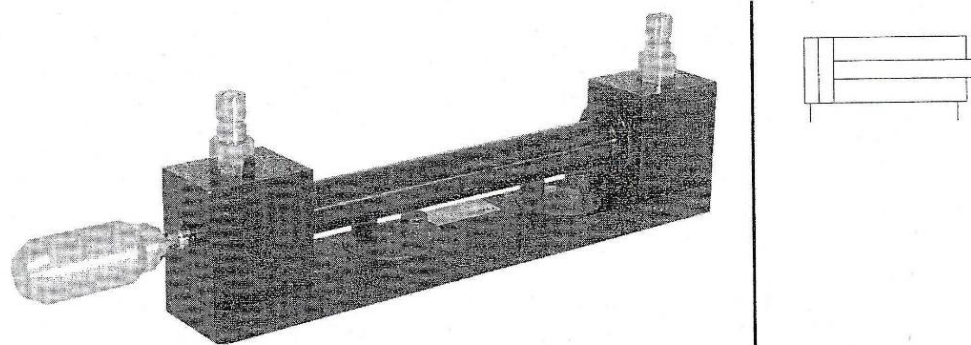


## ANEXO 05: CILINDRO HIDRÁULICO

Cilindro, 16/10/200

152857

1/1

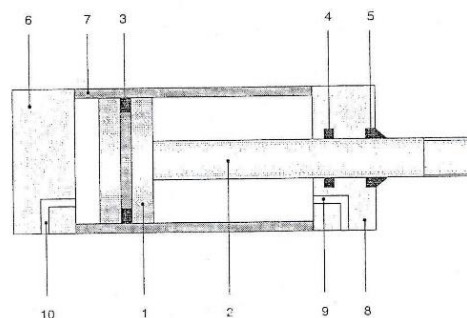


### Diseño

Este cilindro de doble efecto con leva y dos boquillas de conexión está montado sobre una placa. El componente se fija sobre la placa perfilada utilizando el sistema giratorio por medio de dos tuercas con tetones (variante de montaje "B").

El cilindro consiste en:

Embolo (1), vástago (2), junta del émbolo (3), junta del vástago (4) anillo rascador (5), base del cilindro (6), camisa del cilindro (7), culata del cilindro (8), conexiones (9) y (10).



### Función

La vista en sección muestra el vástago (2) en su estado retraído. El vástago avanza cuando la superficie del émbolo (1) se somete a presión por medio de un fluido hidráulico a través de la conexión (10). El fluido hidráulico desplazado se descarga a través de la conexión (9).

La carrera de retroceso del vástago (2) se inicia dando presión a la superficie anular (1) a través de la conexión (9). El fluido hidráulico desplazado se descarga a través de la conexión (10).

El anillo rascador (5) protege a la junta del vástago contra la penetración de la suciedad.

### Nota

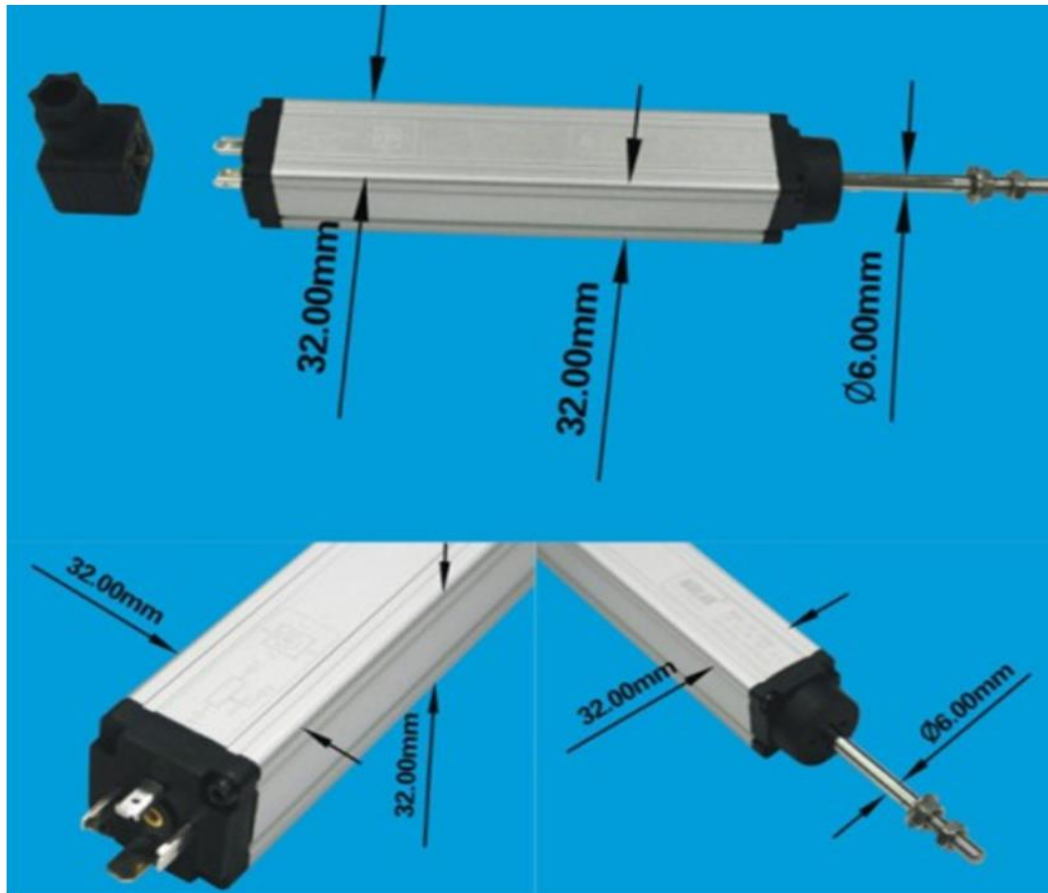
Si el cilindro se utiliza junto con el peso N° de art. 152792, asegurarse de que el cilindro se halla firmemente montado. Por razones de seguridad, asegurarse también que se utiliza la correspondiente cubierta de protección N° de art. 152973.



Medio	Aceite mineral, viscosidad recom. 22 cSt (mm <sup>2</sup> /s)
Diámetro del émbolo	16 mm
Diámetro del vástago	10 mm, con rosca M8 y planos de 7 mm
Carrera	200 mm
Presión de funcionamiento p	60 bar (6 MPa)
Presión máx. de func. p <sub>max</sub>	120 bar (12 MPa)
Conexiones	Para 2 zócalos de acoplamiento
<i>Sujeto a cambios</i>	

Datos técnicos

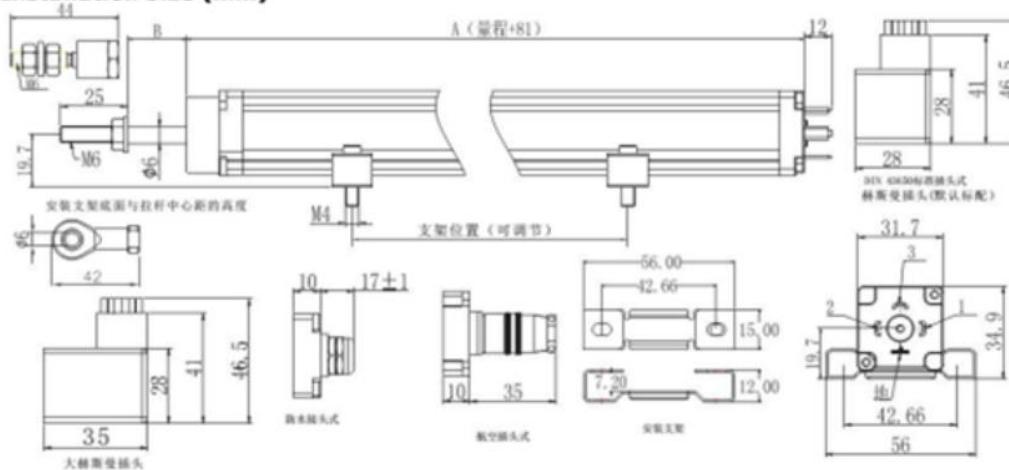
## ANEXO 06: POTENCIÓMETRO LINEAL



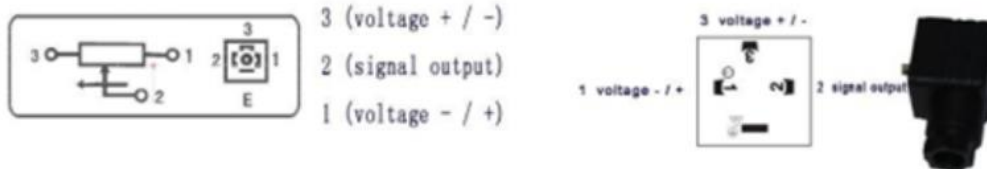
Selection Description		Technical Specifications	
MODEL	KTC1-		
stroke	mm	0~1250mm can be selected	
Entry cable	C	Waterproof cable joint	
	P	Air plug	
	H1	Hessman plug (Standard)	
	H(2, 3, 4)	Hessman plug	
Connection Mode	W	Joint (Standard)	
	W1	Extended Joint	
	YW	Fisheye Joint	
Signal Output	R	Resistant Output (power supply: 0~36V, Standard)	
	V1	0~5V Voltage Output (power supply: 15~24V)	
	V2	0~10V Voltage Output (power supply: 15~24V)	
	A1	4~20mA Current Output, three wire system (power supply: 15~24V)	
	A2	4~20mA Current Output, two wire system (power supply: 15~24V)	
<p>Note: the shipping goods will be delivered out according to the red word if there is not other requirements.</p> <p>shipping goods also includes:</p>			

<b>KTC1 draw-bar series</b>	50~110mm	125~175mm	200~550mm	600~1000mm	1150~1250mm
Linear Precision ( $\pm\%$ FS)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.04\%$	
Resistance ( $\pm 10\%$ )	5K $\Omega$			10K $\Omega$	20K $\Omega$
Effective Stroke	range+7mm				
Resolution	Infinite				
Repeatability Precision	0.01mm				
Max Speed	10m/S				
Recommended Current	$\leq 1\text{mA}$				
Temperature Range	$-60^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$				
Output	0~100% x input voltage (change with the movement of the rod)				
Sensitivity	1				
Temperature Drift	infinitesimal				
Very long life	$>100*1000000$ cycles, $>25*1000000$ m				

**Installation Size (mm)**



**Electrical Installation / Wire Connections**



Brand Name: MIRAN

DIY Supplies: Electrical

Item: MP - A1/A2/V1/V2 - N/S Module

Dimension: 70.0mm x 34.05mm x 38.80mm

Output Type: 4-20mA / 0-5V / 0-10V

Model Number: MP - A1/A2/V1/V2 - N/S Module

Output Signal Transmission: 4-20mA / 0-5V / 0-10V

#### Descripción del producto

#### Product Description

MIRAN MP - A1/A2/V1/V2 - N/S Module for KTC / LWH / KTF / KTF1



Vistos re



## ANEXO 07: SLIDER

### Item specifics

Brand Name: MIRAN

Output Type: Analog Sensor

Item: KFM Mini Slide Position Sensor

Linearity: 0.1%FS-0.05%FS

Resolution: Infinite

Temperature: -60 degree centigrade~+150 degree centigrade

Power Supply: 3V~36V

Model Number: KFM Mini Slide Position Sensor

DIY Supplies: Electrical

Measurement Stroke: 10mm~300mm

Resistance: 1kiloohm-5kiloohm

Repeatability Precision: 0.01mm

Very Long Life: 100x10<sup>6</sup> Cycles

Max Speed: 5m/s

### Product Description

#### Product Description

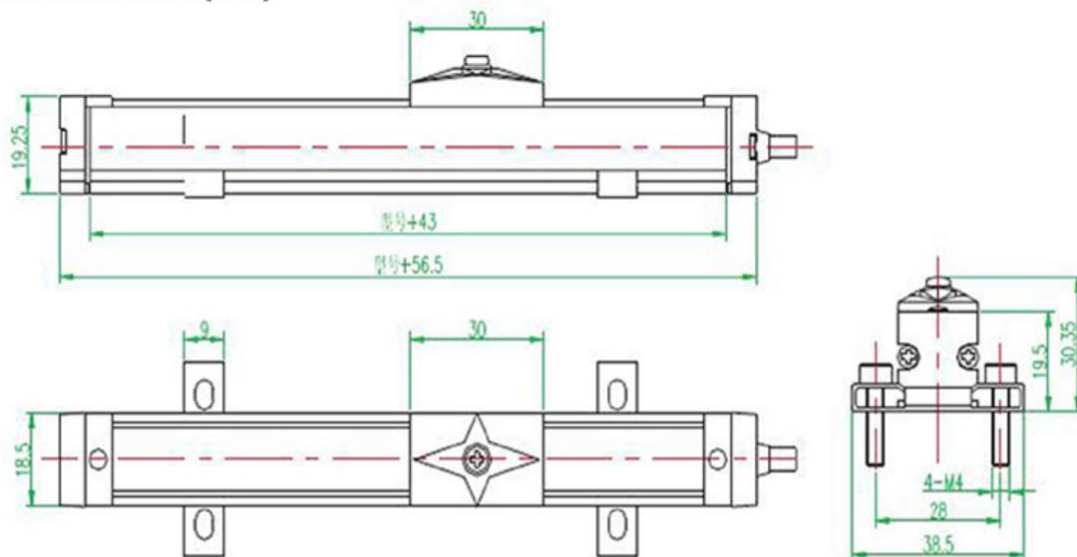
Miran KFM 10mm-300mm Mini Slide Position Sensor Free Shipping Linear Potentiometer Speed 5m/s Linearity 0.1%FS

#### Standard Specifications:

KFM	10mm	15mm	25mm	50~75mm	100~300mm	Stroke Length (mm)
Linear Precision (±%FS)	±0.1%				±0.05%	10 15 25
Resistance (±10%)	1KΩ				5KΩ	50 75 100
Effective Stroke	range+3mm					125 150 175
Resolution	Infinite					200 225 250
Repeatability Precision	0.01mm					275 300
Max Speed	5m/S					
Recommended Current	≤10μA					
Temperature Range	-60℃~+150℃					
Output	0~100% × input voltage (change with the movement of the rod)					
Sensitivity	1					
Temperature Drift	infinitesimal					
Very long life	>100*1000000 cycles,>25*1000000 m					

Re

### Installation Size (mm)



**Applications: KFM is a minitype of a slider, suitable for small spaces, such like: medical equipments, automatic doors, light industry machines and so on.**



# ANEXO 08: GUIAS DE PRÁCTICAS

	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES  ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA - ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA  LABORATORIO DE CONTROL MECATRÓNICO III  TEMA: RECONOCIMIENTO DE TARJETA PID  Alumno:	Página: 1 de 6  Jefe de Prácticas Ing. Marcelo Quispe C.  Semestre IX  Lab N° 01  Fecha:
--	--	---

**I. OBJETIVO**

1. Dar un reconocimiento a la tarjeta Regulador PID de Festo
2. Poder comparar las características de la tarjeta.

**II. MARCO TEORICO**

En el caso de un regulador PID, se hallan conectados en paralelo tres elementos de regulación en bucle cerrado.

- Un elemento "P", con  $y_P = K_P \cdot e$
- Un elemento "I", con  $y_I = K_I \cdot \int e \cdot dt$
- Un elemento "D", con  $y_D = K_D \cdot \frac{de}{dt}$

Los resultados de los elementos individuales se reúnen en un punto de adición.

- $y = y_P + y_I + y_D$

Aparte del regulador en bucle cerrado, también se hallan las siguientes conexiones:

- Variable de entrada: Variable de referencia "w" y variable regulada "x"
- Comparador: Desviación del sistema "e"; bajo la ecuación  $e = w - x$
- Offset: Señal de regulación  $y \pm \Delta U$

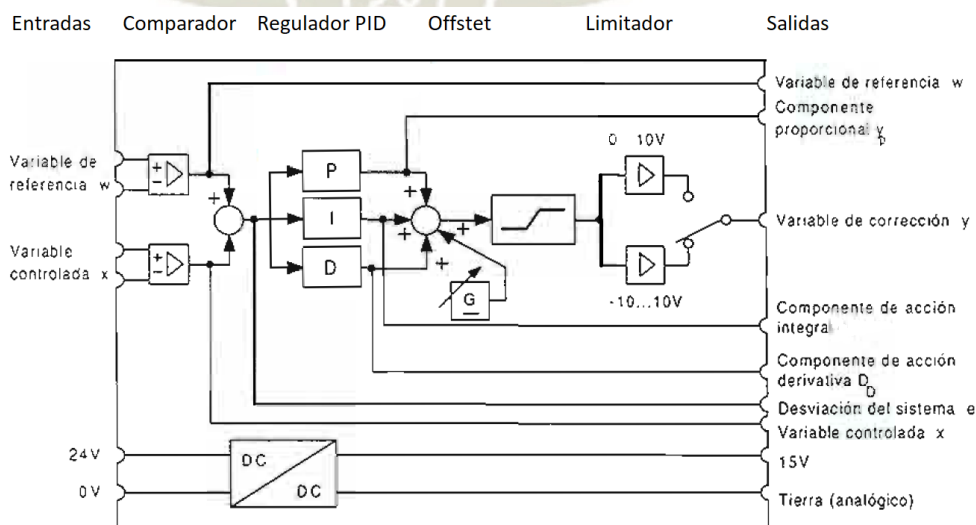


Figura 1: Esquema Regulador PID

Antes de poder realizar alguna conexión debemos tener en cuenta el rango voltajes que puede soportar la tarjeta

<i>Variables de entrada</i>	<i>Variable de referencia: w</i>	0 V - 10 V
	<i>Variable regulada: x</i>	0 V - 10 V
<i>Variable de salida</i>	<i>Variable de corrección: y</i>	0 V - 10 V ó ± 10 V
<i>Otras características</i>	<i>Tensión de alimentación</i>	24 V
	<i>Conexiones de tensión sensores</i>	15 V ó 24 V
	<i>Offset</i>	5 V ± 3.5 V ó ± 7 V
	<i>Limitador</i>	0 V - 10 V ó ± 10 V

### REGULADOR P

El factor proporcional es un elemento importante del regulador, amplifica la señal de entrada “e” en un factor determinado y transfiere la señal de salida  $y_p$ .

La señal de salida  $y_p$  es preprocesada como señal de regulación a través del Offset y del limitador, en conclusión, al solo usarse un regulador P, la ecuación del regulador es:

$$y_p = K_p \cdot e \quad \rightarrow \quad y_p = K_p \cdot (w - x)$$

Las características típicas de un regulador P, por ejemplo, que la amplitud del escalón de la variable de salida es  $K_p$  veces mayor que el de la variable de entrada.

### III. MATERIAL Y EQUIPO

- Fuente de tensión 24 V
- Tarjeta Reguladora PID
- Tarjeta de Valor de Consigna (02)
- Multímetro
- Cables eléctricos M4

### IV. PROCEDIMIENTO

1. Antes de comenzar, verificar que todos los parámetros de la tarjeta se encuentran en su posición inicial, esto quiere decir que, el “Offset” se encuentre a la posición intermedia y el limitador a ± 10 V.

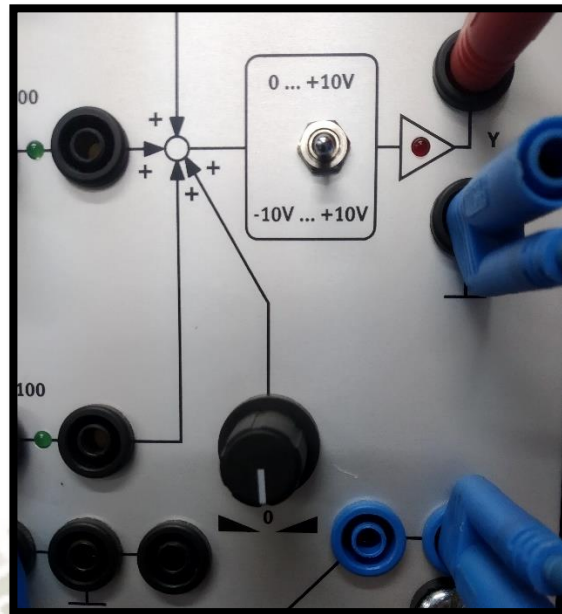


Figura 4: Puesta en estado inicial de la tarjeta

- Se procede a alimentar las tarjetas en las tomas de 24 V (borne rojo) y 0 V (borne azul)  
**Siempre medir las señales analógicas respecto al tierra analógico, mas no con el tierra fisico (0V), nunca deben puentearse ya que se provoca mediciones erroneas**



Figura 5: Alimentación de las tarjetas con 24 VDC

- Se procede a medir el rango de las 2 variables de entrada; la sobrecarga se indicará por medio de un LED, la conexión se realizará de la salida de la Tarjeta de Valor de Consigna, hacia la entrada "w" de la Tarjeta Regulador PID.

Ojo: El led de saturación se activará cuando se alcancen los extremos de consigna programados ya en la tarjeta

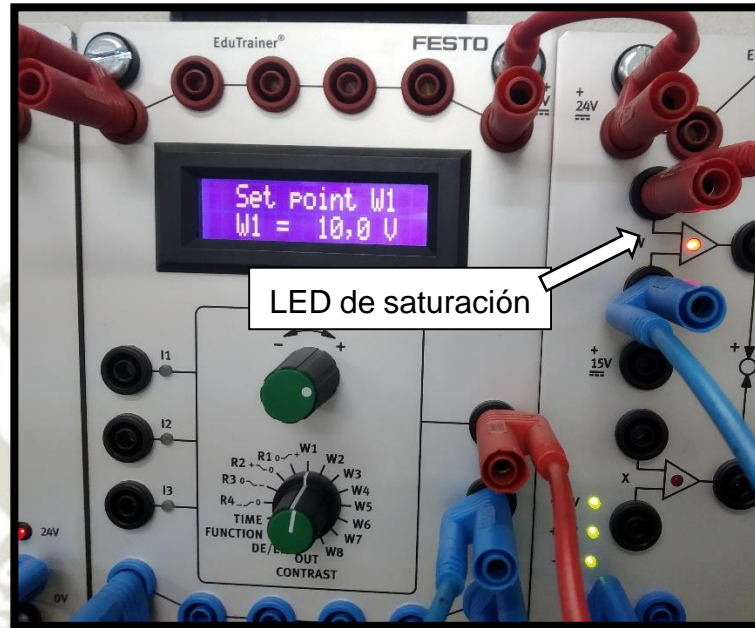


Figura 6: Caso donde se prende el LED

- La salida de cada Tarjeta de Punto de Consigna, se conecta con las 2 entradas del Regulador PID (“w” y “x”), si la salida de ambas tarjetas de consigna son 0 V, se mide con un multímetro la desviación del sistema  $e = w - x$ , deberá ser 0.

Hacer la siguiente tabla de mediciones

w	x	e
0	0	0
1	0	1
1	1	0
3	1	2
5	3	2
10	5	5

Ahora necesitamos 2 tarjetas de Valor de Consigna, entonces las salidas de cada tarjeta ira a las entradas “w” y “x” respectivamente; la medición se hará al final del diferenciador y con respecto a tierra analógica.

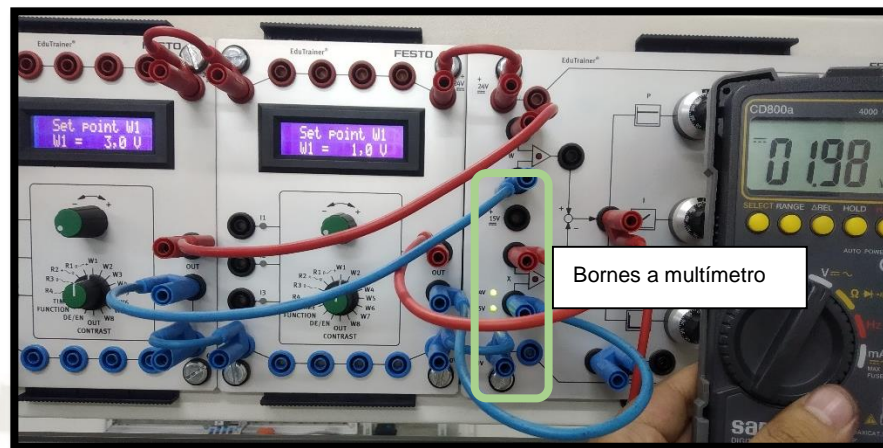


Figura 7: Medición del error de 2 entradas

### Regulador P

5. Se ponen todos los parámetros a 0, limitador a  $\pm 10$  V, Offset = 0 (con ayuda del multímetro)
6. El cociente del regulador  $K_p = 1$ , el ajuste del regulador es con el potenciómetro y el interruptor rotativo como se muestra a continuación.

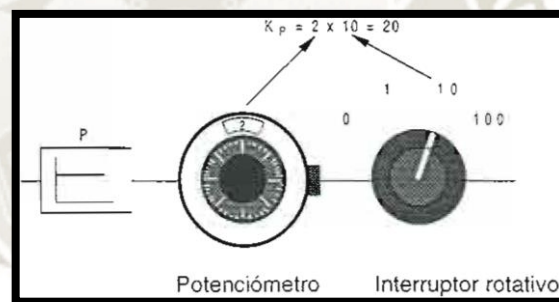


Figura 8: Perillas de ajuste de  $K_p$

7. Hacer mediciones con diferentes Set Points y diferentes ajustes del regulador P  
Depende del set point fijado y del multiplicador P, nuestra salida podrá tomar solamente hasta 10 VDC, ya que llega a saturación.

Verificar la siguiente tabla

w	$K_p$	y
0	0	0
1	0	0
1	1	1
2	2	4
5	1	5
5	2	10

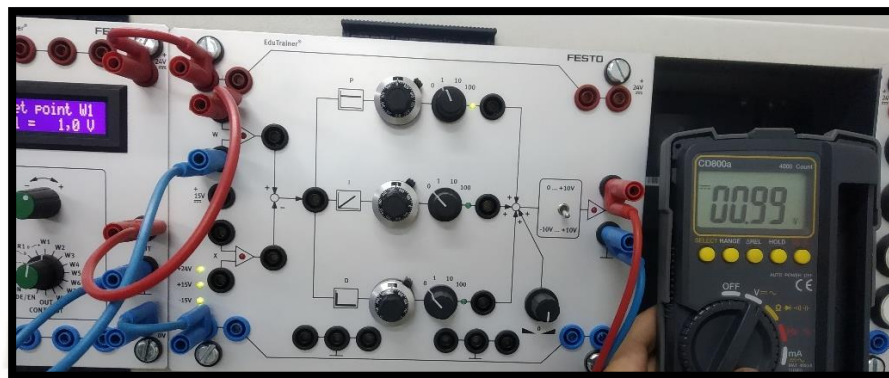



Figura 9: Medición de la salida "y"

**Nota:** En el caso de que usar el multiplicador 10 o 100 del interruptor rotativo, se verá como se prende el LED de saturación.

	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	Página: 1 de 6
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA - ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA	Jefe de Prácticas
	LABORATORIO DE CONTROL MECATRÓNICO III	Ing. Marcelo Quispe C.
	TEMA: VÁLVULAS PROPORCIONALES	Semestre IX
	Alumno:	Lab N° 02
	Fecha:	

### I. OBJETIVO

1. Conocer el funcionamiento de un circuito hidráulico proporcional.
2. La velocidad de avance debe controlarse por medio de una válvula proporcional de 4/3 vías y de un amplificador de dos canales.

### II. MARCO TEORICO

Las válvulas proporcionales, también llamadas continuas, son válvulas de infinitas posiciones en las cuales se cumple que: la magnitud de salida (caudal, presión, posición del carrete o spool) es proporcional a la magnitud de la señal de entrada (corriente continua)

La válvula se compone de un cuerpo con dos solenoides a los extremos (de carrera regulada), dos resortes que cumplen la función de centrar el spool, y cuatro puertos (P, T, A y B); al ser una válvula simple, el solenoide actúa directamente sobre el spool.

Una gran parte de válvulas continuas requieren un elemento capaz de comandar la válvula; decimos una gran parte ya que otras traen acoplado este elemento en su mismo cuerpo; este elemento es el amplificador, convirtiendo una señal de control en una de potencia, en nuestro caso, el amplificador convierte la señal eléctrica (voltaje) de  $\pm 10$  VDC a una corriente continua de hasta 1 amperio.

### III. MATERIAL Y EQUIPO

- Fuente de tensión 24 V
- Tarjeta de Valor de Consigna
- Tarjeta Amplificador Proporcional
- Multímetro
- Cables eléctricos M4
- Cilindro hidráulico con tapa de protección

- Válvula proporcional 4/3 vías
- Válvula de cierre y mangueras

#### IV. PROCEDIMIENTO

1. Armar el circuito hidráulico primeramente como se muestra en la figura.

**Precaución: siempre el armado se realizará con la bomba apagada y teniendo en cuenta que se está trabajando a una presión de 5 MPa.**

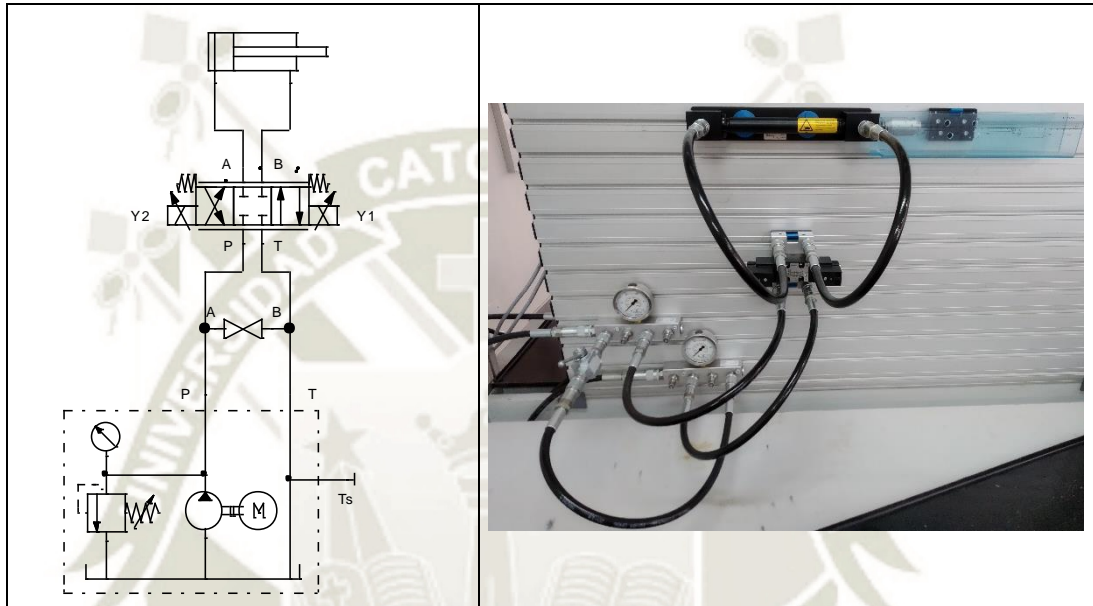


Figura 1: Esquema y circuito hidráulico montada en el panel

2. Realizar las conexiones de los componentes eléctricos como se muestra a continuación:

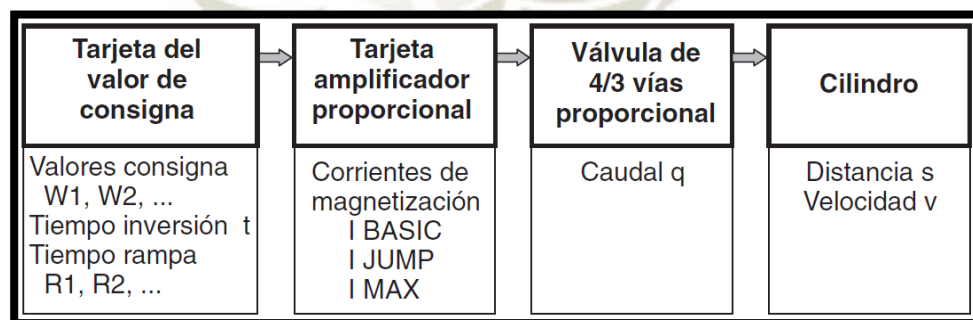


Figura 2: Diagrama de bloques

La tarjeta de valor de consigna es la que generará voltajes desde -10 a 10 voltios, estos en pasos de 0.1 voltios y con los pulsadores podemos elegir dichos valores fijados.

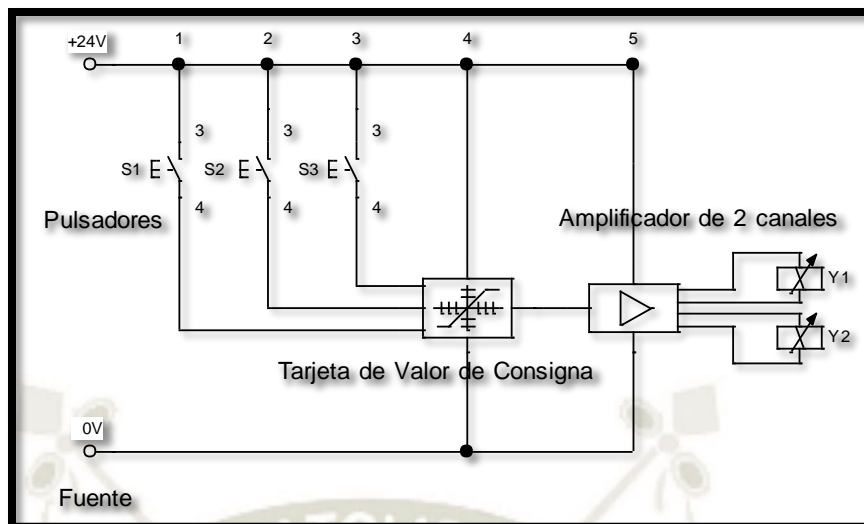


Figura 3: Esquema del circuito eléctrico

Las conexiones de salida de los pulsadores se conectan a I1, I2 e I3 respectivamente; la salida de consigna irá conectada a la entrada W1 del amplificador; a su vez las salidas A y B del amplificador irán a los solenoides de la válvula proporcional

La salida A se activa cuando los valores de consigna son positivos (0 a 10 v), mientras que la salida B cuando son negativos (-10 a 0 v).

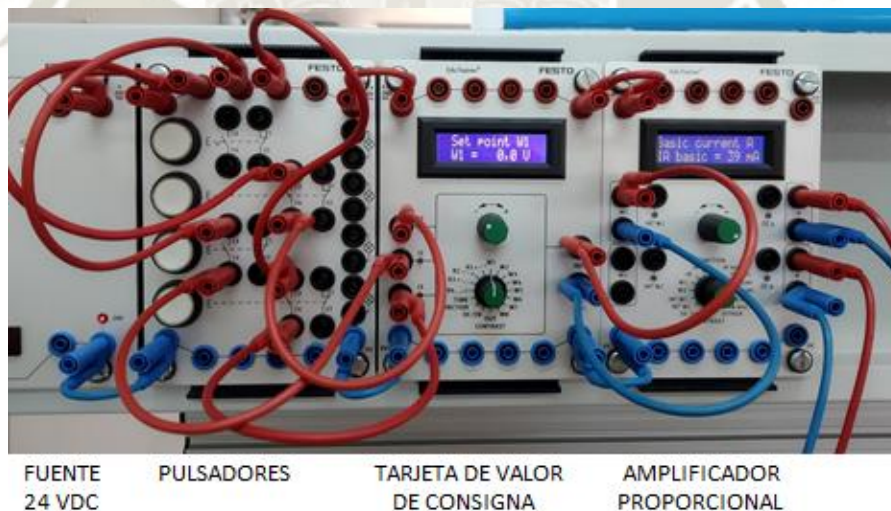


Figura 4: Detalle de conexiones eléctricas

- El amplificador debemos configurarlo girando la perilla inferior hasta que marque FUNCTION y tenemos que escoger "2-channel amplifier" que significa amplificador de 2 canales, esto es así ya que con una sola señal de entrada controlaremos los 2 solenoides de nuestra válvula proporcional.

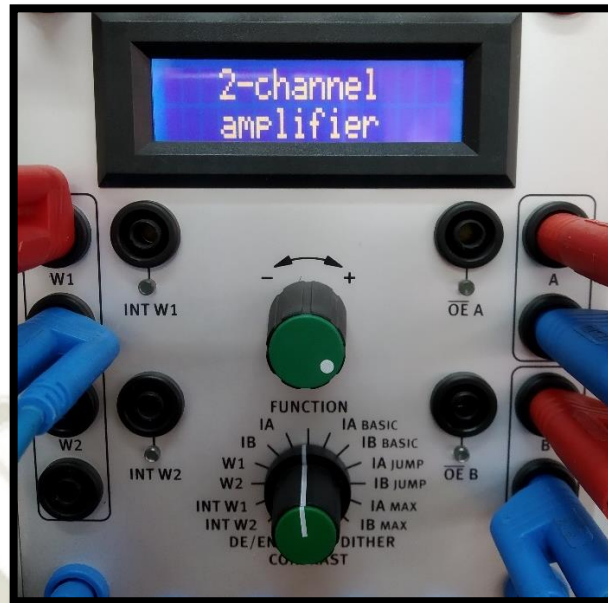


Figura 5: Configuración de parámetros tarjeta amplificadora

4. Finalizando el armado, queda como se muestra a continuación

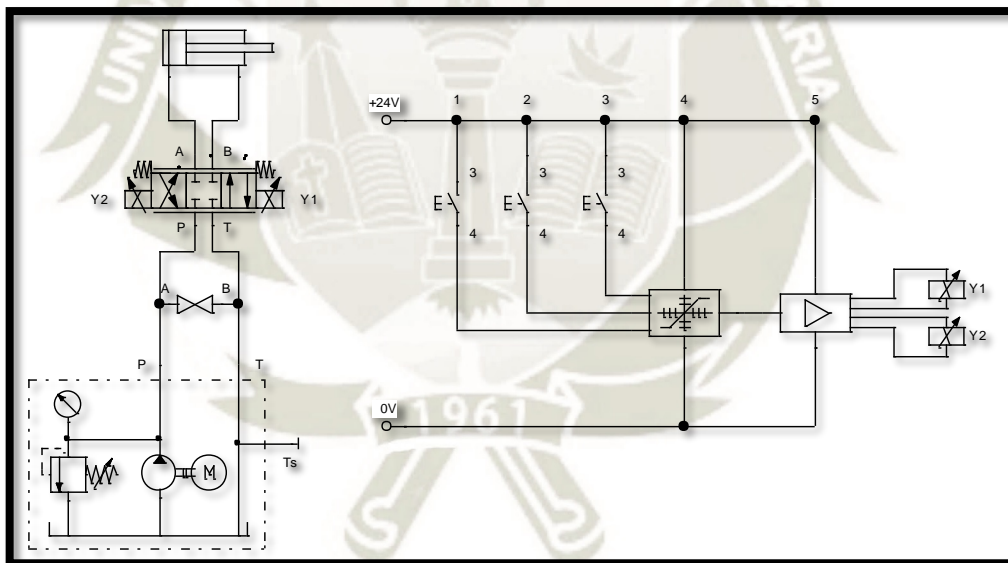


Figura 6: Simulación en FluidSIM H

Realizar la simulación y armar en el panel como se muestra en las figuras

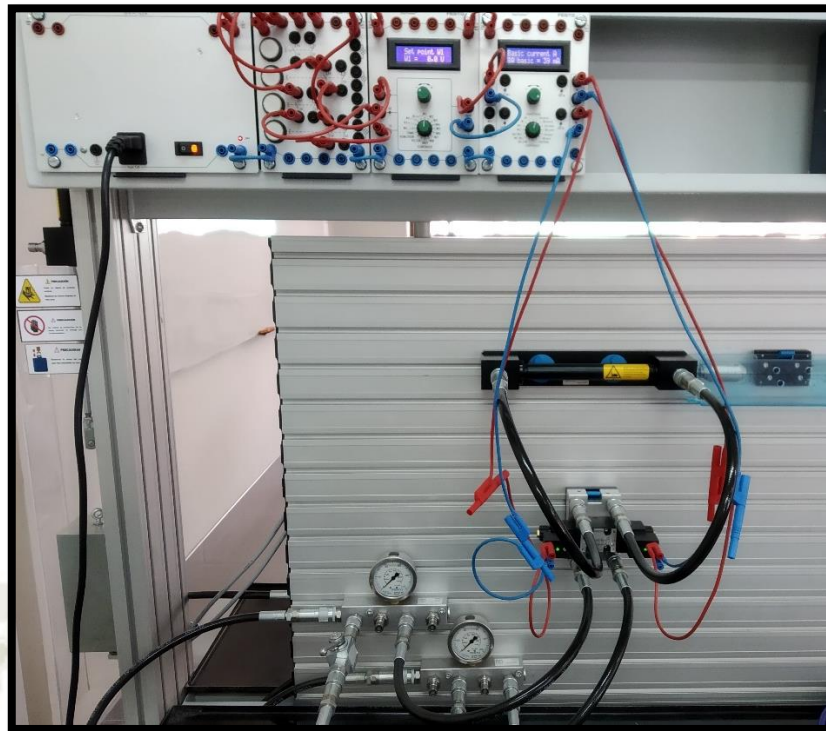
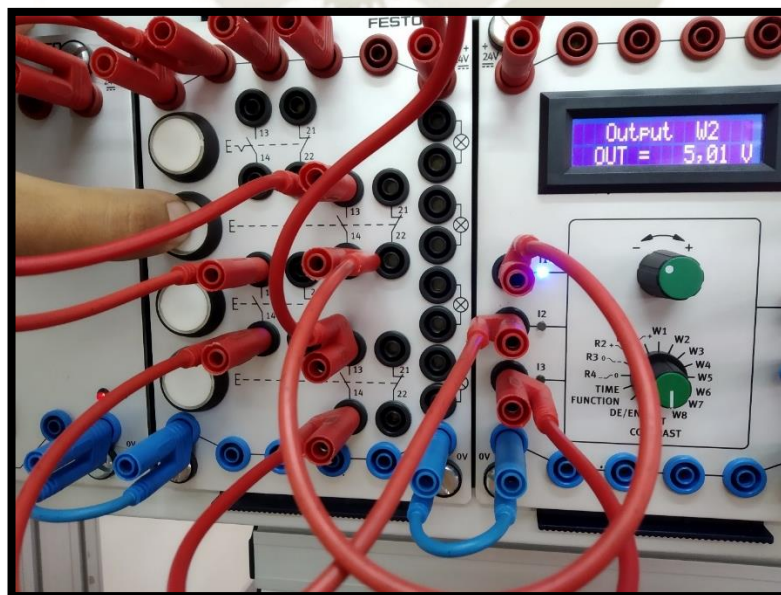


Figura 7: Circuito eléctrico e hidráulico armado en el panel

5. El conexionado de los pulsadores nos sirve para poder elegir manualmente los valores de set point fijados con anterioridad en la tarjeta de valor de consigna. Se observa que al oprimir el pulsador correspondiente a la entrada I1, esta se energiza con 24 volts y se indica su activación mediante el LED de su costado.




6. Hacer las pruebas con diversos niveles de voltaje y configurar de la manera siguiente para notar los cambios de velocidad de acuerdo a la tensión.

Entrada	Tensión
<b>W1</b>	-10
<b>W2</b>	1
<b>W3</b>	2
<b>W4</b>	3
<b>W5</b>	5
<b>W6</b>	6
<b>W7</b>	8
<b>W8</b>	10

Se dejará el nivel de tensión w1 siempre en -10 para que el cilindro regrese a su posición retraída cada vez que no se pulse o se suelte uno o más pulsadores.

Anotar cuanto tiempo demora en salir el vástago por completo con cada valor de consigna y graficar.

	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	Página: 1 de 5
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA - ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA	Jefe de Prácticas
	LABORATORIO DE CONTROL MECATRÓNICO III	Ing. Marcelo Quispe C.
	TEMA: BUCLE CERRADO DE REGULACIÓN	Semestre IX
	Alumno:	Lab N° 03
		Fecha:

## I. OBJETIVO

- Crear un bucle cerrado de regulación para el control de posición un cilindro hidráulico
- Estudiar el montaje y funcionamiento de una unidad lineal

## II. MARCO TEORICO

### SENTIDO DE REGULACIÓN

Tenemos que tener bien en cuenta que, en un sistema en bucle cerrado, un incremento en la variable de referencia “w” produce un incremento en la variable regulada “x”.

De ser así, el punto consigna y la variable actual en bucle cerrado responden en el mismo sentido, tener en cuenta la polaridad de los elementos que están dentro del bucle de regulación, sino el sentido estará invertido y nos dará resultados erróneos.

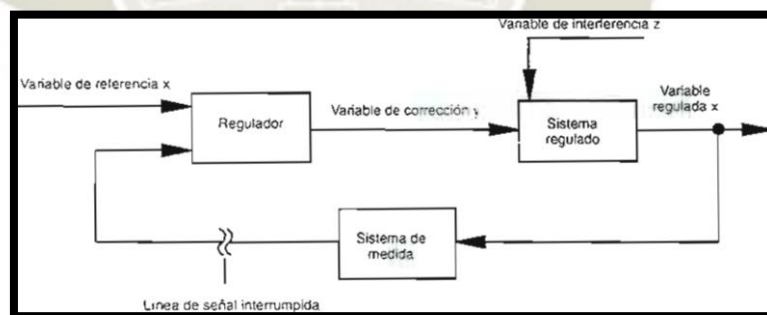


Figura 1: Bucle cerrado de regulación

Un bucle cerrado de regulación de la posición consta de:

- La válvula proporcional 4/3 vías como elemento final de control.
- Un cilindro hidráulico como sistema regulado.
- El sensor de desplazamiento lineal como realimentación para la variable regulada.
- Un controlador

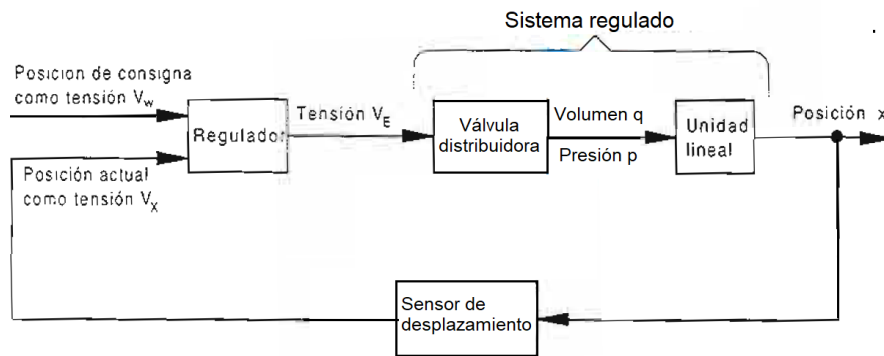


Figura 2: Elementos del bucle de regulación.

Uno de los criterios para lograr una buena sintonización del bucle es alcanzar una posición cualquiera “x”, a la mayor velocidad y precisión posibles; para ello es importante un breve tiempo de estabilización y una mínima desviación del sistema. Más importante aún es que no haya sobrecarreras, es decir, que **no se produzcan oscilaciones** al alcanzar la posición.

La finalidad de un sistema de regulación de posición no es tan solo alcanzar la posición deseada, también se necesita a menudo, mantener una velocidad específica.

La tarea de regulación es entonces adaptar el valor actual con las características del punto de consigna; es decir el valor real será el valor de consigna, pero con un obligado retraso; es por esto que estos sistemas se conocen como sistemas servoregulados.

### III. MATERIAL Y EQUIPO

- Fuente de tensión 24 V.
- Tarjeta Reguladora PID.
- Tarjeta de Valor de Consigna.
- Cilindro hidráulico con Potenciómetro.
- Válvula proporcional 4/3 vías.
- Filtro hidráulico.
- Multímetro.

### IV. PROCEDIMIENTO

- a. Antes de comenzar, verificar que todos los parámetros de la tarjeta se encuentran en su posición inicial, esto quiere decir que, el “Offset” se encuentre a la posición intermedia, el limitador a  $\pm 10$  V y el  $K_p = 1$ .

- b. Se conecta la salida de la Tarjeta de Punto de Consigna a la entrada “w” y la salida del potenciómetro lineal a la entrada “x” del Regulador PID, previamente se alimenta el transductor con 15 V; siempre tomar de referencia la tierra analógica.
- c. La salida “y” se conecta a la entrada del Amplificador de 2 canales y las salidas de este se conectarán a ambas bobinas de la válvula proporcional.

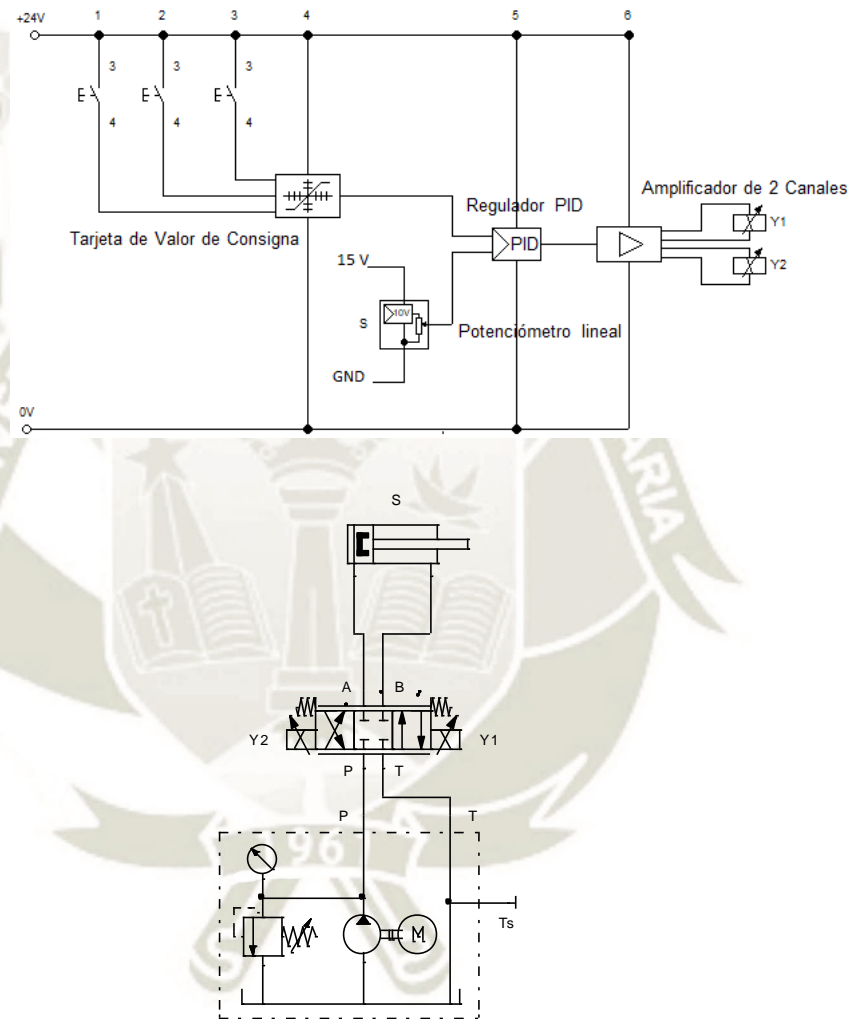
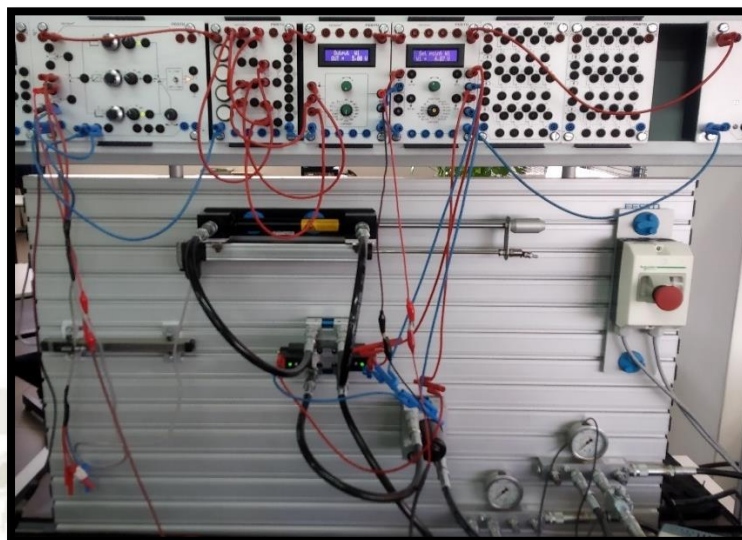


Figura 2. Esquema de conexión eléctrico e hidráulico

- d. Entonces al fijar un valor de consigna de  $w=5V$ , entonces el cilindro deberá desplazarse hasta llegar a una posición cercana a los 100 mm, si es así es que se han conectado los componentes correctamente y el sentido de la regulación es correcto, lo que faltaría es llegar a los criterios de desempeño adecuados.



- e. Ajustar empíricamente el parámetro  $K_p$  para poder obtener desempeños cercanos al deseado.

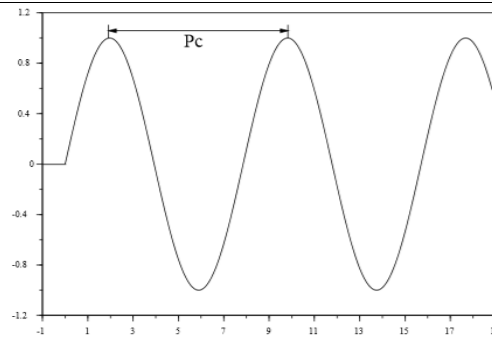
#### SINTONIZACIÓN POR METODO DE OSCILACIÓN

- f. Para sintonizar los parámetros, llevaremos al sistema a oscilaciones estables, con esto hallaremos el  $K_c$  (coeficiente de  $K_p$  crítico), sin tener en cuenta los demás parámetros de corrección como el  $K_i$  o el  $K_d$
- g. Se recomienda ir aumentando el  $K_p$  hasta llegar al mínimo error estacionario y de ahí ir aumentando los demás parámetros, si el sentido de la regulación es correcto, al aumentar los parámetros aumentará la señal de corrección
- h. Registrar la ganancia crítica del controlador  $K_p = K_c$  y el período de oscilación de la salida del controlador,  $P_c$ .
- i. Ajustar los parámetros del controlador según la tabla:

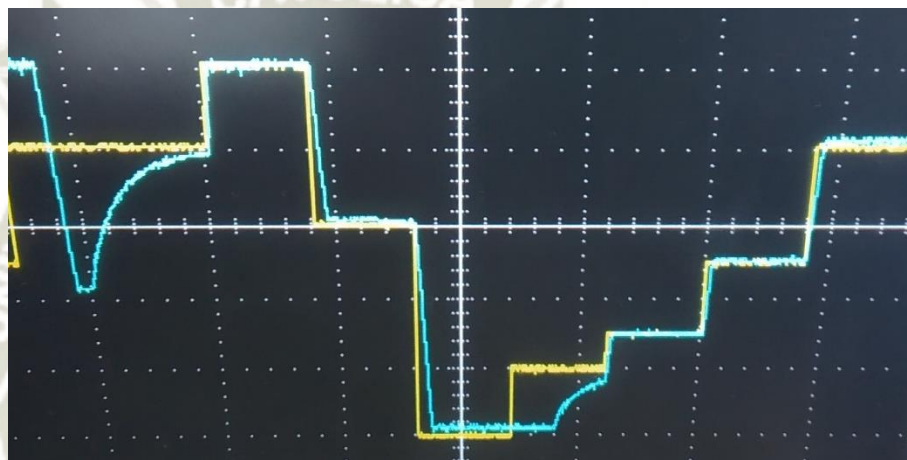
**Tabla 1:** Parámetros de ajuste PID


	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_c$		
PI	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

- j. Llevaremos la planta hasta que oscile como se muestra en la siguiente figura:



- k. Se procede a calcular las ganancias y ver cual es el controlador que sintoniza mejor nuestra planta, los resultados los veremos en un osciloscopio.



	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	Página: 1 de 5
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA - ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA	Jefe de Prácticas
	LABORATORIO DE CONTROL MECATRÓNICO III	Ing. Marcelo Quispe C.
	TEMA: HIDRÁULICA PROPORCIONAL EN FLUIDSIM	Semestre IX
	Alumno:	Lab N° 04
		Fecha:

**I. OBJETIVO**

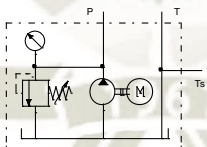


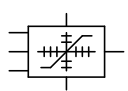


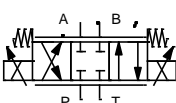
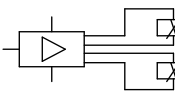
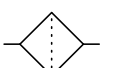

- a. Usar el software FluidSIM-H para realizar simulaciones de sistemas hidráulicos
- b. Reconocimiento de simbología hidráulica según la norma DIN ISO 1219

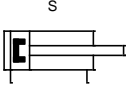
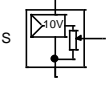
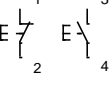

**II. MARCO TEORICO**

FluidSIM es una herramienta de simulación para la obtención de los conocimientos básicos de la hidráulica y electrohidráulica. Una característica importante de FluidSIM es su estrecha relación con la función y simulación CAD.

FluidSIM permite, por una parte, un esquema DIN justo de diagramas de circuitos fluidos; por otra parte, posibilita la ejecución – sobre la base de descripciones de componentes físicos – de una simulación plenamente explicativa. Con esto se establece una división entre la elaboración de un esquema y la simulación de un dispositivo práctico.

**Simbología**

Unidad Hidráulica		Fuente de voltaje 24VDC	
Manómetro		Tarjeta de valor de consigna	
Válvula de cierre		Generador de Funciones	
Válvula proporcional 4/3 vias		Amplificador proporcional de 2 canales	
Filtro hidráulico		Regulador PID	

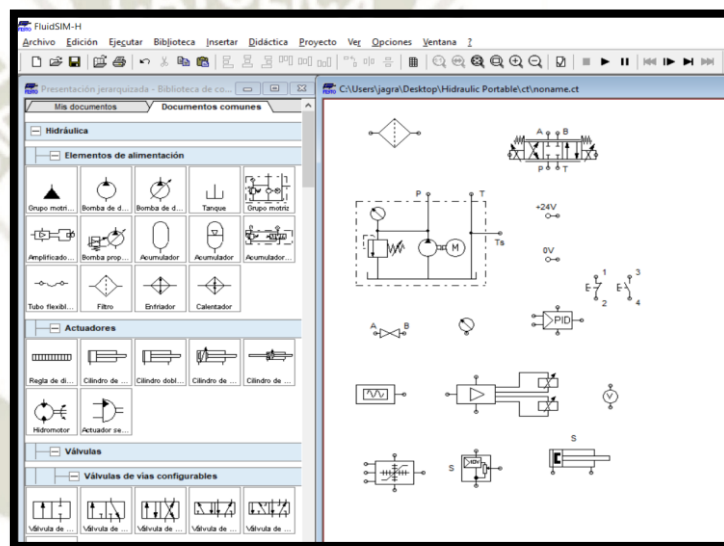
Cilindro con transductor lineal		Transductor lineal	
Pulsadores NC/NA		Voltímetro	

### III. MATERIAL Y EQUIPO

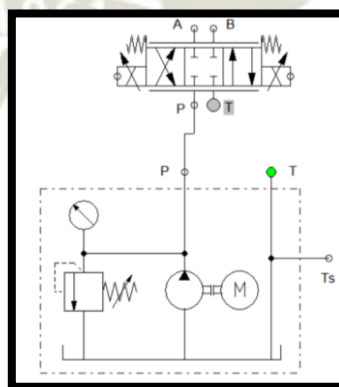
- PC con FluidSim H 4.2 o superior

### IV. PROCEDIMIENTO

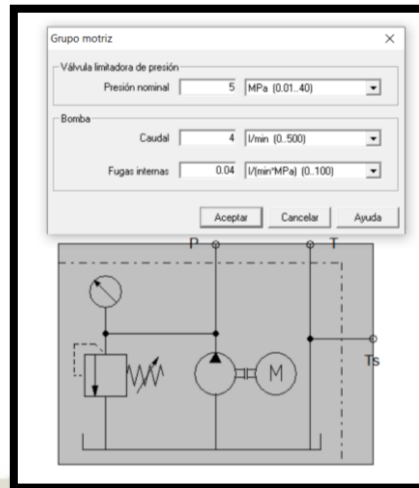
1. Abrir una nueva hoja e identificar los componentes en la parte izquierda de la pantalla.



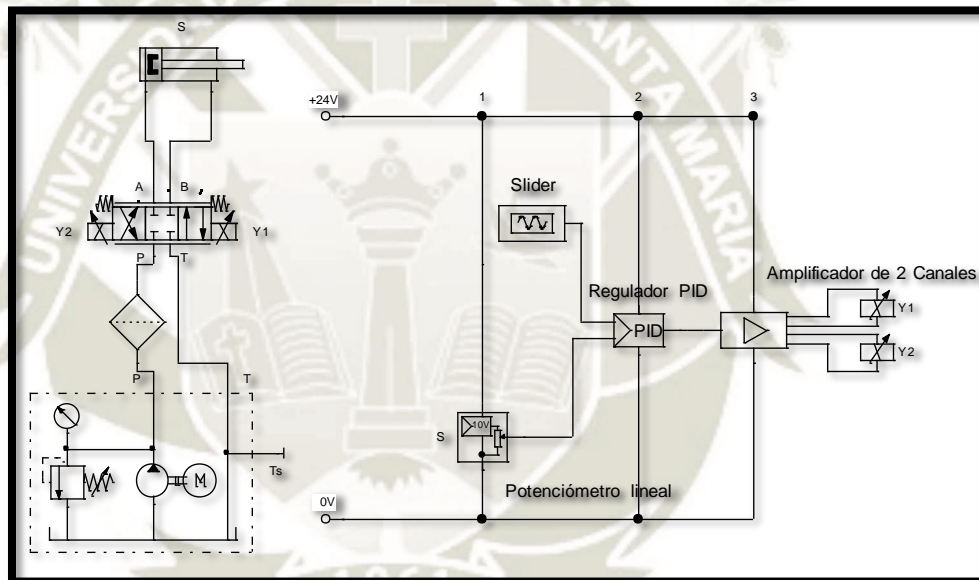
2. Las conexiones se realizan haciendo click y jalando hacia el otro componente.



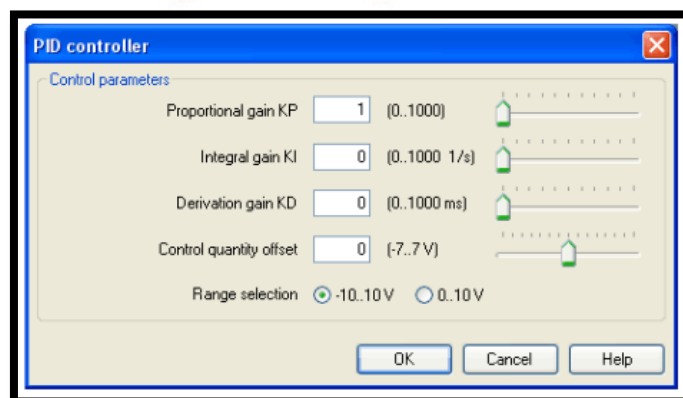
3. Configuración de los parámetros del sistema hidráulico, se da doble click al símbolo correspondiente al equipo y se configura a 4 l/min y 5 MPa



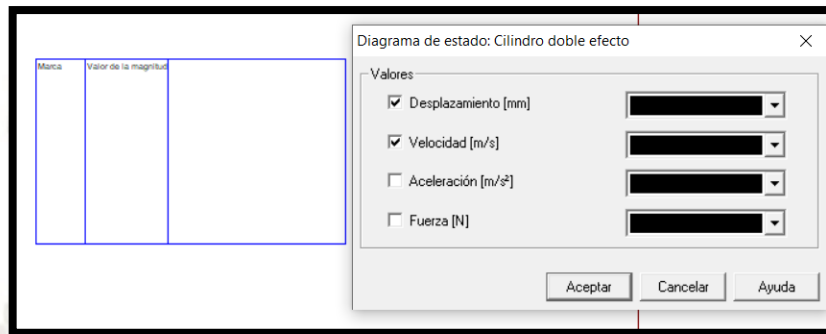
4. Dibujar el siguiente circuito



5. Una vez dibujado se procede a darle "Play" esto iniciará la simulación y se configuran los parámetros del controlador haciendo doble clic al símbolo del Regulador PID



6. Para ver los resultados de la simulación se agregará un componente llamado Diagrama de estado; arrastrando el cilindro y soltándolo dentro del recuadro azul nos aparecerá un listado de las características que podemos ver acerca del mismo



7. Entonces Podemos ir viendo la respuesta del sistema a diferentes escalones y también con diferentes ganancias del controlador PID.

