



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID
VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN
TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA**

Eliú Jonatán González Dieguez

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID
VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN
TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELIÚ JONATÁN GONZÁLEZ DIEGUEZ

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympos Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftali López Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 1 de agosto de 2014.



Eliú Jonatán González Dieguez

Guatemala, 5 de septiembre 2015.

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador de Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Andrino:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA", desarrollado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica Eliu Jonatán González Diéguez con carné 2008-19290, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRONICO
COL. # 5898



REF. EIME 04. 2016.

Guatemala, 21 de OCTUBRE 2016..

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE
CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN TANQUE DE AGUA
CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA, del estudiante Eliú
Jonatán González Diéguez , que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área Electrotécnica



STO



REF. EIME 04. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ELIÚ JONATÁN GONZÁLEZ DIÉGUEZ Titulado: DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 4 DE FEBRERO 2016.



DTG. 205.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE UN TANQUE DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUIDLAB-PA**, presentado por el estudiante universitario: **Eliú Jonatán González Dieguez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme dado las capacidades necesarias y concederme la oportunidad de completar mi carrera.
Mis padres	Ermides González y Gladis Diéguez de González.
Mis hermanos	Obed y David González.
Mis hermanas	Astrid y Jamileth González.
Mi tía	Blanca Olínda González.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una entidad dedicada a la excelencia académica y haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Por tener un alto nivel académico y explotar mis capacidades al máximo.
Mis padres	Ermides González y Gladis Diéguez de González, por todo el esfuerzo realizado para ayudarme a finalizar mi carrera profesional.
Ing. Guillermo Puente	Por su apoyo como mi asesor de tesis y por motivarme a culminar mi carrera profesional con éxito.
Instructor Mario Tacam	Por apoyarme en el desarrollo técnico y realización de pruebas de medición.
Intecap	Por ser una institución dedicada al desarrollo de las habilidades técnicas a través de la práctica.
Mi familia	Por el apoyo incondicional y siempre estar presente en todo momento y por el amor que une a la familia.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
TABLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX

1.	FUNDAMENTOS DEL CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO.....	1
1.1.	Sistemas de control	1
1.1.1.	Componentes básicos de un sistema de control	3
1.1.2.	Ejemplos de aplicaciones de sistemas de control.....	3
1.1.3.	Sistemas de control de lazo abierto	4
1.1.4.	Sistema de control de lazo cerrado	6
1.1.5.	¿Qué es la realimentación y cuáles son sus efectos?	8
1.1.6.	Efecto de la realimentación en la ganancia global..	11
1.1.7.	Efecto de la realimentación en la estabilidad.....	12
1.1.8.	Efecto de la realimentación en la sensibilidad	13
1.1.9.	Efecto de la realimentación sobre perturbaciones externas o ruido	15
1.1.10.	Tipos de sistemas de control realimentados.....	17
1.1.10.1.	Sistemas de control lineales <i>versus</i> no lineales.....	18

1.1.10.2.	Sistemas invariantes con el tiempo <i>versus</i> variantes con el tiempo	20
1.1.10.3.	Sistemas de control en tiempo continuo.....	21
1.1.10.4.	Sistemas de control en tiempo discreto.....	24
1.1.11.	Diagramas de bloques	27
1.1.12.	Diagramas de bloques en sistemas de control.....	29
1.2.	Controles PID	34
1.2.1.	El controlador PID	34
1.2.1.1.	Acción proporcional.....	35
1.2.1.2.	Acción integral.....	39
1.2.1.3.	¿Qué es un controlador PI?	41
1.2.1.4.	Acción derivativa	42
1.2.1.5.	Implementación clásica de la acción derivativa	45
1.3.	Método de Ziegler & Nichols	45
1.3.1.	El método de la respuesta al escalón.....	46
2.	TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS COMPACT WORKSTATION Y ESAYPORT USB PARA LA APLICACIÓN DE LOS CONTROLES PID.....	53
2.1.	Sistema de medida.....	53
2.2.	Transductores, sensores y accionamientos	55
2.2.1.	Acondicionamiento y presentación.....	57
2.2.2.	Tipos de sensores	58
2.2.2.1.	Sensor ultrasónico.....	60
2.2.2.2.	Sensor de flujo o caudal	62
2.3.	EasyPort USB	65

2.3.1.	Comunicación con EasyPort USB	80
2.3.2.	Estructura de órdenes	82
2.3.3.	Nivel de transmisión EasyPort USB.....	83
2.4.	Fluid Lab PA	84
2.5.	Utilización del software	85
2.5.1.	Modificación de los textos.....	88
2.5.2.	Ajustes en el software.....	90
2.5.3.	Medición de la presión	93
2.5.4.	Válvula reductora de la presión	96
3.	SINTONIZACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE NIVEL Y DE FLUJO DE AGUA.....	101
3.1.	Descripción del equipo	102
3.1.1.	Módulo Compact Workstation.....	102
3.1.2.	Bomba centrífuga	106
3.1.3.	Módulo de control PWM	106
3.1.4.	Sensor de caudal.....	108
3.1.5.	Sensor ultrasónico	109
3.2.	Detalle de calibración del software	110
3.3.	Mediciones de nivel de agua	115
3.4.	Mediciones de flujo de agua	133
4.	DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUID LAB-PA..	147
4.1.	Implementación de control PID para nivel de agua	147
4.2.	Implementación de control PID para flujo de agua	161
	CONCLUSIONES	173

RECOMENDACIONES	175
BIBLIOGRAFÍA.....	177
APÉNDICES.....	179

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Componentes básicos de un sistema de control.....	3
2.	Elementos de un sistema de control de lazo abierto.....	6
3.	Diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad en ralentí en lazo cerrado.....	7
4.	Respuesta típica del sistema de control de velocidad en ralentí en lazo abierto (a) y lazo cerrado (b)	8
5.	Sistema realimentado.....	11
6.	Sistema con dos lazos de realimentación	13
7.	Sistema realimentado con una señal de ruido	17
8.	Diagrama de un sistema típico CD en lazo cerrado	23
9.	Diagrama de un sistema de control de CA típico en lazo cerrado.....	24
10.	Diagrama de bloques de un sistema de control de datos muestreados ..	25
11.	Sistema de autopiloto digital para un misil guiado	26
12.	Diagrama de bloques de un sistema de control de un motor de CD	29
13.	Diagrama de bloques con funciones de transferencia y características del amplificador.....	29
14.	Elementos de un diagrama de bloques de dispositivos típicos de detección de sistemas de control (a) función resta, (b) función suma, (c) función suma y resta, (d) multiplicación	31
15.	Diagrama de bloques básicos de un sistema de control realimentado ..	32
16.	Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple	35
17.	Simulación de un sistema de lazo cerrado con control proporcional.....	37

18.	Implementación de la acción integral como realimentación positiva alrededor de un sistema de primer orden	42
19.	Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional e integral.....	42
20.	Interpretación de la acción derivativa como control predictivo, donde la predicción se obtiene por extrapolación lineal	44
21.	Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional, integral y derivativo	44
22.	Implementación clásica de la acción derivativa	45
23.	Caracterización de la respuesta en escalón en el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols	47
24.	Método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto	49
25.	Pasos 1 y 2 del método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto.....	50
26.	Respuesta de la variable de proceso al cambio de CV.....	51
27.	Estructura general de un sistema de control.....	54
28.	Sensor ultrasónico utilizado en el proceso de control de nivel.....	62
29.	Sensor de caudal utilizado en el proceso de control de flujo	64
30.	Sistema DAQ en bloques.....	65
31.	Ejemplo de aplicación, configuración con un proceso simulado y un PLC real.....	67
32.	Configuración con cuatro módulos EasyPort USB.....	68
33.	Composición del EasyPort USB	77
34.	Panel de mandos e indicación del EasyPort USB	78
35.	Órdenes de escritura y lectura en modo de terminal	81
36.	Configuración de <i>bytes</i> de la palabra 0.....	83
37.	Ejemplo de una orden de lectura	83
38.	Grupo principal, selección de programa	85
39.	Programas parciales, selección de funciones.....	86

40.	Ejemplo de escalas de medición y colores para representación de los datos medidos.....	87
41.	Ejemplo para cambio de tipo de línea, estilo o color de la gráfica.....	87
42.	Portal de acceso para modificación de los textos	89
43.	Menú de ajuste de factor y <i>offset</i>	91
44.	Conexión de los detectores.....	92
45.	Botón de guardado de datos para los detectores.....	92
46.	Ventana de medición de presión en Fluid Lab	93
47.	Subprograma para captación de datos de medición Fluid Lab	94
48.	Subprograma para línea característica de estrangulación en Fluid Lab.....	95
49.	Subprograma para ajuste y medición de la válvula reductora de la presión.....	97
50.	Componentes MPS compact Workstation.....	103
51.	Diagrama de instrumentación	104
52.	Bomba centrífuga.....	106
53.	Módulo PWM.....	107
54.	Conexión módulo PWM.....	108
55.	Pantalla inicial Fluid Lab PA.....	111
56.	Configuración Fluid Lab PA.....	112
57.	Pendiente del sensor ultrasónico	115
58.	Ventana de medición	117
59.	Prueba de medición de nivel	118
60.	Gráficas del software.....	120
61.	Dispersión general de nivel	124
62.	Nivel de agua con CV al 50 %.....	127
63.	Nivel de agua con CV al 55 %.....	128
64.	Nivel de agua con CV al 65 %.....	131
65.	Pendiente del sensor de caudal	135

66.	Prueba de medición de flujo	137
67.	Dispersión general de flujo	138
68.	Curva tangente.....	140
69.	Mapeo de flujo al 60 %	142
70.	Mapeo de flujo al 80 %	144
71.	Acceso a control de lazo cerrado continuo	148
72.	Ventana control de lazo cerrado continuo, bloques	149
73.	Ventana control de lazo cerrado continuo, parámetros.....	151
74.	Gráfica de control PID de nivel etapa 1	152
75.	Gráfica de control PID de nivel etapa 2	153
76.	Gráfica de control PID de nivel etapa 3	154
77.	Gráfica de control PID de nivel etapa 4	155
78.	Gráfica de control PID de nivel etapa 5	156
79.	Gráfica de control PID de nivel etapa 6	157
80.	Gráfica de control PID de nivel etapa 7	158
81.	Gráfica de control PID de nivel etapa 8	159
82.	Gráfica de control PID de nivel etapa 9	160
83.	Bloque y cambios para PID de flujo	163
84.	Gráfica de control PID de flujo etapa 1	164
85.	Gráfica de control PID de flujo etapa 2	165
86.	Gráfica de control PID de flujo etapa 3	166
87.	Gráfica de control PID general.....	167

TABLAS

I.	Parámetros del controlador para el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols.....	48
II.	Ecuaciones del método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto	52
III.	Clasificaciones de los sensores	60

IV.	Ejemplos de aplicación con EasyPort USB	70
V.	Datos técnicos generales de EasyPort USB	72
VI.	Datos técnicos generales de EasyPort USB (continuación).....	73
VII.	Datos técnicos de la interface SysLink para señales digitales	74
VIII.	Datos técnicos del conector Sub B tipo zócalo, para señales analógicas.....	75
IX.	Datos técnicos de la interface RS232	76
X.	Simbología de instrumentación del módulo.....	105
XI.	Punto pendiente al 55 %	129
XII.	Punto pendiente al 65 %	132
XIII.	Resumen de resultados del mapeo de nivel	133
XIV.	Resumen de resultados del mapeo de flujo	146

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
°C	Grados Celsius
Kbaud	Kilo baudio
l/min	Litros por minuto
mA	Miliamperios
mm	Milímetros
Δ	Razón de cambio de un valor con referencia a otro
CV	Variable de control
PV	Variable de proceso
VDC	Voltios de corriente directa

GLOSARIO

Algoritmo	Serie de pasos, que realiza una tarea concreta en un tiempo finito, previniendo todas las situaciones posibles.
ASCII	Es un código binario que permite la representación de caracteres alfanuméricos.
Baudio	Unidad de medida de la velocidad de transmisión de una señal codificada equivalente al número de impulsos por segundo.
DDC	Control digital directo, se refiere al control implementado en un proceso a través de una PC o un microcontrolador.
Heurística	Método para aumentar el conocimiento.
Inherente	Constituye un modo de ser intrínseco a un sujeto, y no una relación con otra cosa.
<i>Lag time</i>	Significa tiempo de retardo, en un sistema de control es el tiempo que tarda la reacción a un cambio.
<i>Offset</i>	Interpretado como nivel de compensación, es la magnitud en la que algo está fuera de línea o rango.

OPC	Una especificación de estándares desarrollado en 1966, la norma específica de la comunicación de datos en tiempo real entre dispositivos.
Código IP	Clasifica el grado de protección que ofrece un equipo contra la intrusión de objetos sólidos incluyendo las partes del cuerpo, como manos y dedos, polvo, entre otros.
Ralentí	Número mínimo de revoluciones por minuto que debe tener el motor de un vehículo cuando no está acelerado.
Exógeno	Un estímulo externo e independiente del sistema, son perturbaciones que no dependen del proceso.
Separación galvánica	Separación de partes funcionales de un circuito eléctrico para prevenir el traspaso de portadores de carga.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se desarrolla y caracteriza un sistema de control PID virtual, el mismo fue logrado gracias a la utilización de una estación para desarrollar controles básicos llamada Compact Workstation, la cual posee actuadores y sensores para procesos de nivel y flujo de agua.

La plataforma se controla con un dispositivo de adquisición y generación de señales llamado EasyPortUSB el cual se programa con la plataforma FluidLab-PA, este ensamble de equipos permite desarrollar controles y apicarlos físicamente.

Para apreciar los resultados, la caracterización del control PID se basa en obtener las constantes de control de la estación física, a través de pruebas detalladas según el método elegido, en este caso fue el método Ziegler y Nichols, con el cual se obtienen los parámetros que luego fueron implementados creando un lazo PID dentro de la plataforma para controlar la variable.

La caracterización se basa en enviar señales de control a la bomba centrífuga, la cual es controlada por un PWM, la plataforma cuenta con sensores tanto de nivel como flujo de agua, con los cuales se mide la respuesta del sistema a la perturbación generada por la señal del controlador, de esta manera se realizaron una serie de pruebas implementando el método de Ziegler y Nichols, el cual permite obtener las constantes PID con base en las perturbaciones, el tiempo de retardo y estabilización del sistema.

OBJETIVOS

General

Desarrollar y caracterizar un sistema de control virtual, aplicando los conceptos de un control proporcional, integral y derivativo para los procesos de control de nivel y de flujo de un tanque de agua.

Específicos

1. Presentar las bases y fundamentos de un sistema de control.
2. Presentar los fundamentos proporcional, integral y derivativo de un sistema de control PID.
3. Presentar las características de los equipos Compact Workstation con sus sensores y actuadores y Easyport USB utilizado para el diseño del control PID.
4. Presentar el proceso de sintonización de los equipos de medición de nivel y medición de flujo.
5. Desarrollo y caracterización de un sistema de control PID virtual para los procesos de control de nivel y flujo de agua.

INTRODUCCIÓN

En el capítulo I del presente trabajo de graduación se exponen los conceptos básicos de un sistema de control y los fundamentos del control proporcional, integral y derivativo, así como los diferentes tipos de aplicaciones en sistemas de control y el método Ziegler y Nichols.

En el capítulo II se exponen las características de los distintos equipos y sus aplicaciones, así como el papel que desempeñan en el control PID tanto a nivel de hardware como de software, en este apartado se encuentra la información de la estación física con la que se desarrolla la investigación, así como el actuador y su respectivo software para programar el tipo de control a implementar.

En el capítulo III se realiza la sintonización de los equipos de control para nivel y flujo de agua, se realizan pruebas en los equipos y durante su funcionamiento se utiliza una herramienta para graficar los datos generados, con esto se obtiene la información necesaria y se establecen los parámetros PID de los procesos de nivel y flujo de agua.

En el capítulo IV se implementan los controles PID para flujo y nivel con los parámetros obtenidos en el capítulo III, y se analiza el comportamiento de ambos sistemas de control, para determinar si se obtiene un sistema estable o inestable y exponer la funcionalidad del control.

1. FUNDAMENTOS DEL CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO

En general un sistema de control es un conjunto de equipos que se unen y trabajan de manera integral para alcanzar un resultado común, dicho sistema puede tener diferentes características y está integrado por equipos de acción que son llamados actuadores, las cuales pueden ser: motores, bombas, pistones, entre otros. También se tienen dispositivos que se encargan de medir las magnitudes físicas generadas por estos actuadores, como: temperatura, movimiento, flujo, entre otros, para conocer las condiciones bajo las que se desarrolla el proceso y realizar la respectiva toma de decisiones.

1.1. Sistemas de control

Una de las preguntas que más comúnmente se hace un principiante en sistemas de control es: ¿Qué es un sistema de control? Para responder a esta pregunta, se puede decir que en la vida diaria existen numerosos objetivos que necesitan cumplirse.

Por ejemplo, en el ámbito doméstico, se requiere regular la temperatura y humedad de las casas y edificios para tener un ambiente cómodo. Para transportación, se requiere controlar que un automóvil o un aeroplano se muevan de un lugar a otro en una forma segura y exacta.

En la industria los procesos de manufactura tienen un sinnúmero de objetivos para productos que satisfacen requerimientos de precisión y costo.

Un ser humano es capaz de realizar gran cantidad de tareas, incluyendo tomar decisiones. Algunas de estas tareas tales como coger objetos y caminar de un punto a otro, se realizan de una forma rutinaria. Bajo ciertas condiciones, algunas de estas tareas se realizan de la mejor forma posible. Por ejemplo, un atleta que corre a una distancia de 100 metros tiene el objetivo de correr dicha distancia en el menor tiempo posible.

Por otro lado, un corredor de maratón no solo debe correr la distancia lo más rápido posible, sino también debe controlar el consumo de energía y desarrollar la mejor estrategia para la carrera. La búsqueda para alcanzar tales “objetivos” requiere normalmente utilizar un sistema de control que implante ciertas estrategias de control.

En años recientes, los sistemas de control han asumido un papel cada vez más importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnológica. Prácticamente, cada aspecto de las actividades de la vida diaria está afectado por algún tipo de sistema de control.

Los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria, tales como control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamblaje automático, control de máquinas-herramienta, tecnología espacial y sistemas de armas, control por computadora, sistemas de transporte, sistemas de potencia, robótica y muchos otros.

Aun el control de inventarios y los sistemas económicos y sociales se pueden visualizar a través de la teoría de control automático.

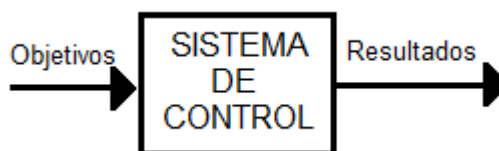
1.1.1. Componentes básicos de un sistema de control

Los componentes básicos de un sistema de control se pueden describir mediante:

- Objetivos de control
- Componentes del sistema de control
- Resultados o salidas

La relación básica entre estos tres componentes se ilustra en la figura 1 en términos más técnicos, los objetivos se pueden identificar como entradas, o señales actuantes u , y los resultados también se llaman salidas, o variables controladas, y en general, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas, a través de los elementos del sistema de control.

Figura 1. Componentes básicos de un sistema de control



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

1.1.2. Ejemplos de aplicaciones de sistemas de control

En la figura 1 se expone un sistema de control simple, se tomará como ejemplo para el sistema de control de un automóvil, la dirección de las dos ruedas delanteras es la variable controlada, o la salida, mientras la señal actuante o que

controla la dirección es el volante, o la entrada que se llama u . el sistema de control para este caso, está compuesto del mecanismo de la dirección y de la dinámica del automóvil completo.

Para un caso contrario, si el objetivo es controlar la velocidad del automóvil, entonces la presión ejercida sobre el acelerador sería la señal actuante, y la velocidad del automóvil sería la variable controlada.

El sistema completo de control simplificado de un automóvil se puede visualizar como uno con dos entradas el volante y acelerador, con dos salidas que son dirección y velocidad. En este caso las dos entradas y las dos salidas son independientes, pero en general, hay sistemas en que los controles están acoplados. Los sistemas con más de una entrada y más de una salida son llamados sistemas multivariables ya que se controlan múltiples salidas y entradas.

1.1.3. Sistemas de control de lazo abierto

Un sistema de control es la integración de múltiples dispositivos que se encargan de controlar, ordenar y dirigir el comportamiento de otros sistemas para alcanzar buenos resultados y menores probabilidades de fallos o desperdicio de recursos, estos sistemas se utilizan principalmente en la industria y en todo proceso que se desee controlar y regular los equipos o máquinas.

En un sistema de control de lazo abierto existe una posibilidad de error muy alta, dado que solo se aplica señal a los elementos encargados de la acción sin haber una medición u observación en el proceso, para poder determinar que se está realizando de manera correcta y eficiente, un sistema de lazo abierto suele

ser mucho más simple, por lo tanto, es para procesos simples en donde se involucra mucho el factor humano.

Esto quiere decir que en función de las habilidades de la persona que controla el sistema, será la eficiencia y desempeño del mismo, a menos que se aplique en un proceso donde las variables están determinadas como por ejemplo, en una lavadora, el tiempo de lavado está determinado por el juicio o estimación humana y en ese momento se puede permitir a la lavadora completar su proceso sin ninguna otra corrección para el mismo.

Realmente no existe como tal un sistema de control de lazo abierto si se ve desde el punto de vista general, dado que siempre habrá un factor humano encargado de regular dicho sistema, pero en términos del sistema a nivel específico se le llama de lazo abierto, porque no hay ningún tipo de retroalimentación.

Este término significa que no hay un elemento dentro del sistema que pueda medir la variable de salida y tener ese dato para poder procesarlo y autocorregir el sistema, significa que el sistema de lazo abierto es un sistema sin autocorrección, pero que dicha corrección en su momento es necesaria aunque es dada de forma externa al proceso y dependiendo como se menciona antes del juicio o estimación humana.

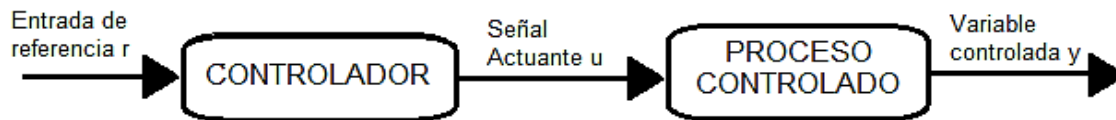
Los elementos de un sistema de control de lazo abierto se pueden dividir en dos partes: el controlador y el proceso controlado, como se ve en la figura 2.

Una señal de entrada o comando r se aplica al controlador, cuya salida actúa como una señal actuante u ; la señal actuante controla el proceso de tal forma que la variable controlada y , se desempeñe de acuerdo con los estándares

preestablecidos. En los casos simples, el controlador puede ser amplificador, unión mecánica, filtro, u otro elemento de control.

En los casos más complejos, el controlador puede ser una computadora, tal como un microprocesador. Debido a la simplicidad y economía de los sistemas de control en lazo abierto, se les encuentra en muchas aplicaciones no críticas.

Figura 2. **Elementos de un sistema de control de lazo abierto**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

1.1.4. **Sistema de control de lazo cerrado**

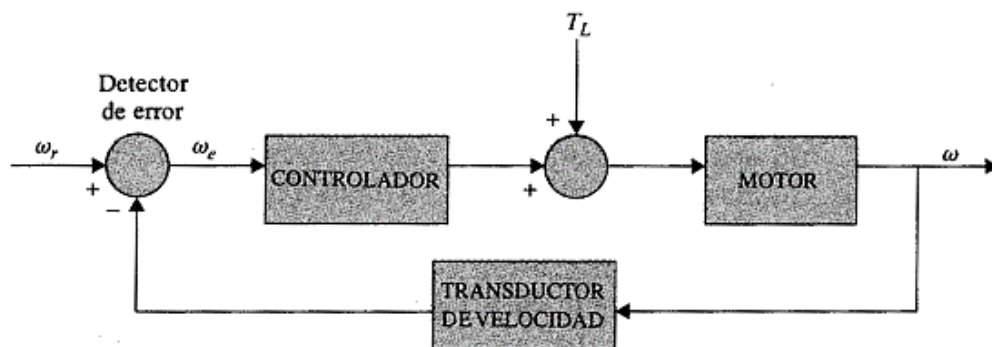
Lo que hace falta en un sistema de control en lazo abierto para que sea más exacto y más adaptable, es una conexión o realimentación desde la salida hacia la entrada del sistema.

Para obtener un control más exacto, la señal controlada y debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida, a través del sistema para corregir el error. Un sistema con una o más trayectorias de realimentación como el que se acaba de describir se denomina sistema en lazo cerrado.

Un sistema de control en lazo cerrado de la velocidad en ralentí se presenta en la figura 3.

La entrada de referencia ω_r proporciona la velocidad en ralentí deseada. La velocidad de motor en ralentí debe estar de acuerdo con el valor de referencia ω_r , y cualquier diferencia tal como la producida por el par de carga T_L , es detectada por el transductor de velocidad y el detector de error. El controlador operará sobre la diferencia y producirá una señal para ajustar el ángulo α del acelerador para corregir el error.

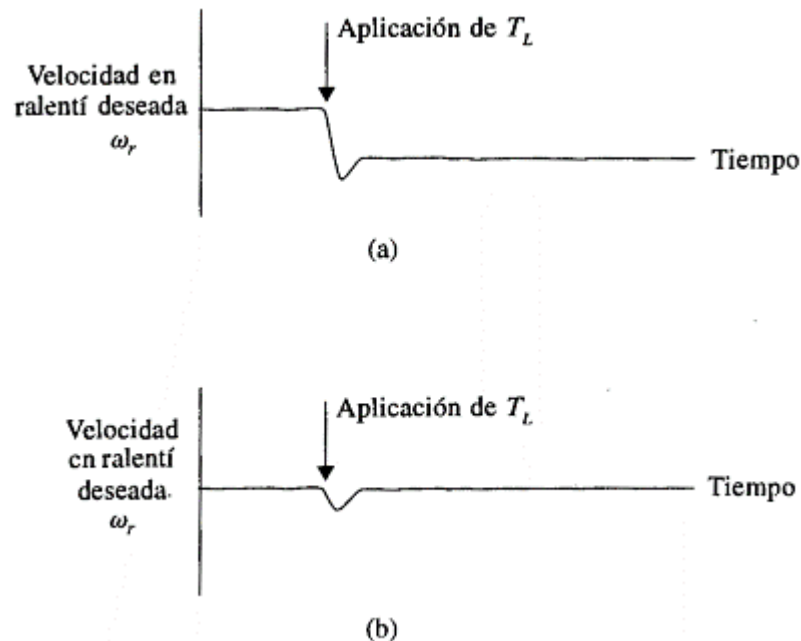
Figura 3. **Diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad en ralentí en lazo cerrado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 10.

La figura 4 compara los desempeños típicos de los sistemas de control de velocidad en ralentí con el lazo abierto y lazo cerrado. En la figura 4 (a), la velocidad en ralentí del sistema en lazo abierto caerá y se desestabilizará con un valor inferior después de aplicar un par de carga. En la figura 4 (b), la velocidad en ralentí del sistema en lazo cerrado se recupera rápidamente a su valor preestablecido después de la aplicación de T_L . El objetivo del sistema de control de velocidad en ralentí ilustrado, conocido como sistema regulador, es mantener la salida del sistema en el nivel preestablecido.

Figura 4. Respuesta típica del sistema de control de velocidad en ralentí en lazo abierto (a) y lazo cerrado (b)



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 10.

1.1.5. ¿Qué es la realimentación y cuáles son sus efectos?

La realimentación o retroalimentación es una serie de mecanismos que se implementan con el fin de corregir un sistema, se toma una proporción de la señal de salida del sistema en el que se implementa y se redirige a la entrada con el fin de controlar su comportamiento y según parámetros pre seleccionados, corregir el dato en la entrada para modificar el resultado de salida.

El objetivo de la realimentación es permitir el control de un sistema y que el mismo sistema de forma autónoma tome las medidas necesarias de corrección, esto según la información realimentada.

El motivo de utilizar realimentación es para reducir el error entre la entrada de referencia y la salida del sistema. Sin embargo, el significado de los efectos de la realimentación en sistemas de control es más complejo que los demostrados en los ejemplos anteriores.

La reducción del error del sistema es solo uno de los efectos más importantes que la realimentación realiza sobre el sistema.

En la figura 5 se mostrará que la realimentación también tiene efectos en características del desempeño del sistema como la ganancia global, perturbaciones, estabilidad, ancho de banda y sensibilidad.

Para entender los efectos de la realimentación sobre un sistema de control, es esencial examinar el fenómeno de forma más integral.

Cuando la realimentación es introducida en forma deliberada para propósitos de control, su existencia se identifica fácilmente. Sin embargo, existen numerosas situaciones en donde un sistema físico, que normalmente se reconocería como un sistema no realimentado, se vuelve uno realimentado cuando se observa de cierta manera.

En general, se puede establecer que cuando una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto existe entre las variables de un sistema, se dice que existe realimentación.

Este punto de vista mostrará, inevitablemente, que existe realimentación en un gran número de sistemas que normalmente se identificarían como sistemas no realimentados.

Sin embargo, con la disponibilidad de la realimentación y de la teoría de sistemas de control, esta definición general permite que numerosos sistemas, con o sin realimentación, sean estudiados en una forma sistemática una vez que la existencia de la realimentación en el sentido de la forma mencionada anteriormente sea establecida.

Ahora se investigarán los efectos de la realimentación en varios aspectos del desempeño de los sistemas.

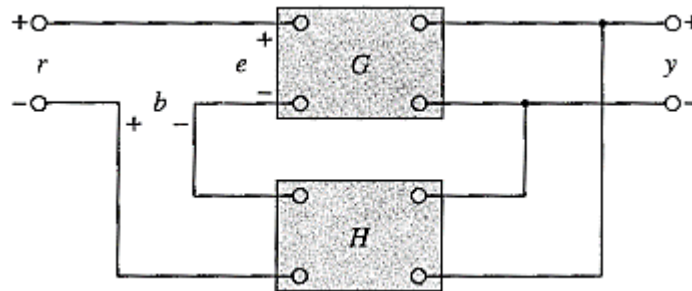
Únicamente se puede emplear la notación de sistemas estáticos para la explicación ya que no se cuenta con los fundamentos matemáticos necesarios de la teoría de sistemas lineales, al menos hasta este punto.

Se considera el sistema realimentado sencillo con la configuración de la figura 5, donde r es la señal de entrada, y la señal de salida, e el error, y b la señal de realimentación.

Los parámetros G y H se pueden considerar como ganancias constantes. Mediante manipulación algebraica simple, es fácil mostrar que la relación entrada-salida del sistema es:

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH} \quad (1)$$

Figura 5. **Sistema realimentado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 12.

1.1.6. Efecto de la realimentación en la ganancia global

Como se observa en la ecuación 1, la realimentación afecta la ganancia G de un sistema no realimentado por un factor de $1 + GH$.

El sistema de la figura 5 se dice tener realimentación negativa, ya que un signo menos se asigna a la señal realimentada. La cantidad GH puede incluir el signo menos, por tanto el efecto global de la realimentación es que puede incrementar o disminuir la ganancia G .

En un sistema de control práctico, G y H son funciones de la frecuencia, por tanto, la magnitud de $1 + GH$ puede ser mayor que 1 en un intervalo de frecuencia positivo pero menor que 1 en un intervalo de frecuencia negativo.

En consecuencia, la realimentación puede incrementar la ganancia del sistema en un intervalo de frecuencia para reducirla en otro.

1.1.7. Efecto de la realimentación en la estabilidad

La estabilidad es una noción que describe si un sistema es capaz de seguir el comando de entrada, o en general, si dicho sistema es útil. En una forma rigurosa, un sistema se dice inestable si sus salidas salen de control.

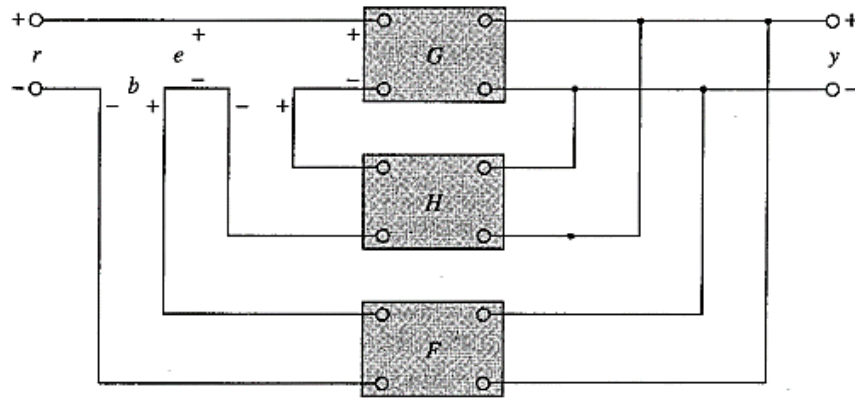
Para investigar el efecto de la realimentación sobre la estabilidad, se hace referencia a la expresión de la ecuación 1. Si $GH = -1$, la salida del sistema es infinita para cualquier entrada finita, y el sistema se dice inestable.

Por tanto, se debe establecer que la realimentación puede ocasionar que un sistema que es originalmente estable, se convierta en inestable. Evidentemente, la realimentación es un arma de dos filos; cuando no se usa adecuadamente, puede ser dañina. Se debe puntualizar que, sin embargo, se está tratando con el caso estático, y en general, $GH = -1$ no es la única condición para la estabilidad.

Se puede demostrar que una de las ventajas de incorporar realimentación es que puede estabilizar un sistema inestable. Suponiendo que el sistema realimentado de la figura 5 es inestable debido a que $GH = -1$. Si se introduce otro lazo de realimentación a través de una ganancia negativa F , como se muestra en la figura 6, la relación entrada-salida del sistema total es:

$$\frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH + GF} \quad (2)$$

Figura 6. **Sistema con dos lazos de realimentación**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 13.

Es aparente que si bien las propiedades de G y H son tales que el sistema realimentado de lazo interno es inestable porque $GH = -1$, el sistema total puede ser estable mediante la selección apropiada de la ganancia F de lazo de realimentación externo. En la práctica, GH es una función de la frecuencia, y la condición para la estabilidad del sistema de lazo cerrado depende de la magnitud y la fase de GH . Por último, la realimentación puede mejorar la estabilidad o también serle dañina si no se aplica de manera adecuada.

1.1.8. Efecto de la realimentación en la sensibilidad

A menudo, las consideraciones sobre sensibilidad son importantes en el diseño de sistemas de control.

Ya que todos los elementos físicos tienen propiedades que cambian con el ambiente y la edad, no se pueden considerar a los parámetros de un sistema de control como completamente estacionarios durante la vida de operación del sistema.

Por ejemplo, la resistencia del embobinado de un motor eléctrico cambia a medida que la temperatura del motor se eleva durante la operación. Las máquinas, algunas veces no funcionan normalmente cuando se encienden por primera vez debido a que los parámetros están cambiando durante el calentamiento.

Este fenómeno es llamado “enfermedad de las mañanas”. La mayoría de las máquinas tienen un período de calentamiento durante el cual la operación es un tanto irregular cuando se encienden por primera vez.

En general, un buen sistema de control debe ser insensible a la variación de los parámetros pero sensible a los comandos de entrada. Se van a investigar qué efectos tiene la realimentación sobre la sensibilidad a la variación de parámetros.

En referencia al sistema de la figura 5, se considera a G como la ganancia de los parámetros, la cual puede variar. La sensibilidad de la ganancia del sistema total M , con respecto a la variación de G se define como:

$$S_G^M = \frac{\partial M / M}{\partial G / G} = \frac{\text{porcentaje de cambio en } M}{\text{porcentaje de cambio en } G} \quad (3)$$

En donde ∂M denota el cambio incremental en M debido al cambio incremental en G , ∂G utilizando la ecuación 1.1, la función de sensibilidad se escribe como:

$$S_G^M = \frac{\partial M}{\partial G} \frac{G}{M} = \frac{1}{1 + GH} \quad (4)$$

La relación muestra que si GH es una constante positiva, la magnitud de la función de sensibilidad se puede hacer arbitrariamente pequeña cuando GH se incrementa, mientras el sistema permanece estable.

Aparentemente, en un sistema en lazo abierto, la ganancia del sistema responde de una forma uno a uno respecto a la variación en G ($S_G^M = 1$). Nuevamente, se debe recordar que en la práctica GH es una función de la frecuencia; la magnitud de $1 + GH$ puede ser menor a uno para algunas frecuencias, por tanto, en algunos casos, la realimentación puede ser dañina a la sensibilidad de la variación de parámetros.

En general, la sensibilidad de la ganancia de un sistema realimentado a la variación de los parámetros depende de donde estén localizados los parámetros. El lector puede obtener la sensibilidad del sistema de la figura 5 debido a la variación de H .

1.1.9. Efecto de la realimentación sobre perturbaciones externas o ruido

Todos los sistemas físicos están sujetos a algunos tipos de señales exógenas o ruido durante su operación. Ejemplos de estas señales son el voltaje de ruido térmico en circuitos electrónicos y el ruido de conmutación en motores eléctricos. Las perturbaciones externas, tal como el viento que actúa sobre una antena, son también muy comunes en sistemas de control. Por tanto, en el diseño de sistemas de control, se deben dar consideraciones para que el sistema sea sensible a ruido y perturbaciones externas, y sensible a comandos de entrada.

El efecto de la realimentación sobre el ruido y perturbaciones depende grandemente de en qué parte del sistema ocurren las señales exógenas.

No se pueden obtener conclusiones generales, pero en muchas situaciones, la realimentación puede reducir los efectos del ruido y las perturbaciones en el desempeño del sistema.

En referencia al sistema de la figura 7, en la que r denota la señal de comando y n es la señal de ruido. En ausencia de realimentación $H = 0$, la salida y debido a n actuando sola es:

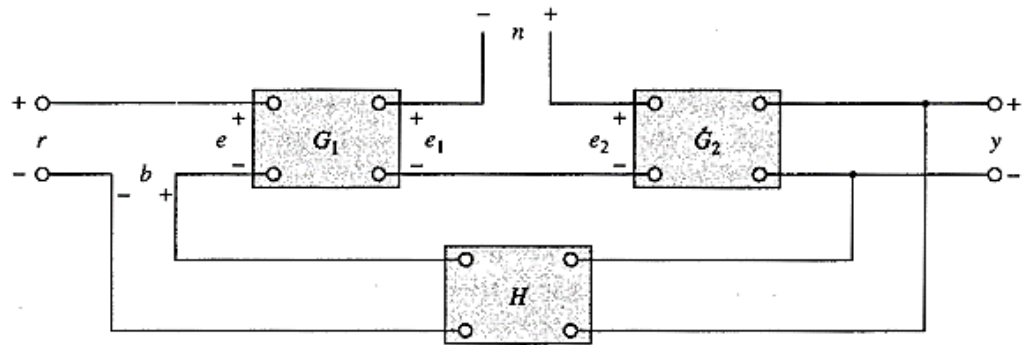
$$y = G_2 n \quad (5)$$

Con la presencia de realimentación, la salida del sistema debido a n actuando sola es:

$$y = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} n \quad (6)$$

Al comparar la ecuación 6, con la 5, se observa que la componente de ruido en la salida de la ecuación 6, se reduce por el factor $1 + G_1 G_2 H$ si este último es mayor que la unidad y el sistema permanece estable.

Figura 7. **Sistema realimentado con una señal de ruido**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 15.

En general, la realimentación también tiene efectos sobre el ancho de banda, la impedancia, la respuesta transitoria y la respuesta en frecuencia. Estos efectos se verán más adelante.

1.1.10. Tipos de sistemas de control realimentados

Los sistemas de control realimentados se pueden clasificar en muchas formas diferentes, según sea el propósito de la clasificación.

Por ejemplo, basándose en el método de análisis y diseño, los sistemas de control se clasifican en lineales y no lineales, variantes con el tiempo o invariantes con el tiempo.

Si se basan en los tipos de señales utilizadas en el sistema, se hace referencia a sistemas en tiempo continuo y en tiempo discreto, o sistemas modulados y no modulados.

Muy frecuentemente, los sistemas de control se clasifican de acuerdo con su propósito principal. Por ejemplo, un sistema de control de posición y un sistema de control de velocidad controlan las variables de salida de acuerdo con la forma como su nombre lo indica.

El tipo de sistema de control se define con base en la forma de la función de transferencia en lazo abierto. En general, existen muchas formas de identificar un sistema de control de acuerdo con alguna función especial del sistema.

Es importante que algunas de estas formas comunes de clasificar a los sistemas de control sean conocidas, para obtener una perspectiva propia antes de embarcarse en su análisis y diseño.

1.1.10.1. Sistemas de control lineales *versus* no lineales

Esta clasificación está hecha con base en los métodos de análisis y diseño. Estrictamente hablando, los sistemas lineales no existen en la práctica, ya que todos los sistemas físicos pueden llegar a ser no lineales en algún grado.

Los sistemas de control realimentados son modelos ideales fabricados por el analista para simplificar el análisis y diseño.

Cuando las magnitudes de las señales en un sistema de control están limitadas en intervalos, en los cuales los componentes del sistema exhiben una característica lineal se aplica el principio de superposición, el sistema es esencialmente lineal.

Pero cuando las magnitudes de las señales se extienden más allá del intervalo de porción lineal, dependiendo el nivel de la no linealidad, no se puede seguir considerando al sistema como no lineal.

Por ejemplo, los amplificadores usados en los sistemas de control a menudo muestran un efecto de saturación cuando la señal de entrada es muy grande; el campo magnético de un motor normalmente tiene propiedades de saturación.

Otros efectos no lineales que se encuentran normalmente en sistemas de control son el juego entre dos engranes acoplados, la característica de resorte no lineal, la fuerza de fricción no lineal o par entre dos miembros móviles, entre otros.

Muy a menudo estas características no lineales son introducidas en forma intencional en un sistema de control para mejorar su desempeño. Por ejemplo, para alcanzar un control de tiempo mínimo, un tipo de controlador *on off*, también llamado de encendido y apagado o relevador, se emplea en muchos misiles o sistemas de control de naves espaciales.

Normalmente en estos sistemas, los motores de reacción están a los lados del vehículo para producir un par de reacción para control de altitud.

Estos motores de reacción son controlados en una forma totalmente encendidos o totalmente apagados, por lo que una cantidad fija de aire es aplicada desde un motor de reacción dado durante cierto tiempo para controlar la altitud del vehículo espacial.

Para sistemas lineales, existe una gran cantidad de técnicas analíticas y gráficas para fines de diseño y análisis. Para esta investigación los sistemas

están limitados a controles autocorregidos, en los cuales se controlan las variables basadas en las características específicas de los equipos a utilizar en el sistema de control.

Por otro lado, los sistemas no lineales son difíciles de tratar en forma matemática, y no existen métodos generales disponibles para resolver una gran variedad de clases de sistemas no lineales.

En el diseño de sistemas de control, es práctico, primero diseñar el controlador con base en un modelo de un sistema lineal sin tomar en cuenta las no linealidades del sistema.

Luego, el controlador diseñado se aplica al modelo del sistema no lineal para su evaluación o corrección, mediante una simulación en computadora según los resultados obtenidos.

1.1.10.2. Sistemas invariantes con el tiempo *versus* variantes con el tiempo

Cuando los parámetros del sistema de control son estacionarios con respecto al tiempo durante la operación del sistema, el sistema se denomina sistema invariante con el tiempo.

En la práctica, la mayoría de los sistemas físicos contienen elementos que varían con el tiempo. Por ejemplo, la resistencia de la bobina de un motor eléctrico variará cuando el motor es excitado por primera vez y su temperatura está aumentando.

Otro ejemplo de un sistema variante en el tiempo es el sistema de control de un misil guiado, en dicho sistema se tiene un cambio radical conforme avanza el misil dado que se consume el combustible y por lo tanto, existe una reducción gradual en el peso del misil, lo cual cambia su característica de inercia.

Aunque un sistema variante en el tiempo con no linealidades es aún un sistema lineal, el análisis y diseño de esta clase de sistemas son mucho más complejos que los de un sistema lineal invariante en el tiempo, dado que la variación es constante y se puede calcular, es un factor más a tomar en cuenta en los cálculos y por lo tanto aumenta su grado de complicación.

1.1.10.3. Sistemas de control en tiempo continuo

Un sistema en tiempo continuo es aquel en el que las señales en muchas partes del sistema son funciones de la variable continua de tiempo t .

Entre todos los sistemas de control en tiempo continuo, las señales se pueden clasificar posteriormente como de corriente alterna o corriente directa.

A diferencia de la definición general de señales de corriente alterna y corriente directa utilizadas en ingeniería eléctrica, los sistemas de control de corriente alterna y corriente directa, tienen un significado especial en la terminología de sistemas de control.

Cuando se hace referencia a un sistema de control de corriente alterna denotado por las siglas CA, usualmente significa que las señales en el sistema están moduladas según algún esquema de modulación.

Por otro lado, cuando se hace referencia a un sistema de control de corriente directa denotado por las siglas CD, no significa que todas las señales en el sistema sean unidireccionales; entonces no se podrían realizar movimientos de control correctivo.

Un sistema de control de CD simplemente implica que las señales no son moduladas, pero aún son señales de CA de acuerdo con la definición previa. El esquema de un sistema de control de lazo cerrado se presenta en la figura 8.

Las formas de ondas típicas de las señales en respuesta a una función escalón de entrada se muestran también en la figura 8. Los componentes típicos de un sistema de control de CD son potenciómetros amplificadores de CD, motores de CD, tacómetros de CD, entre otros.

En la figura 9 se presenta el esquema de un sistema de control equivalente al mostrado en la figura 8 con la particularidad de ser un control de CA.

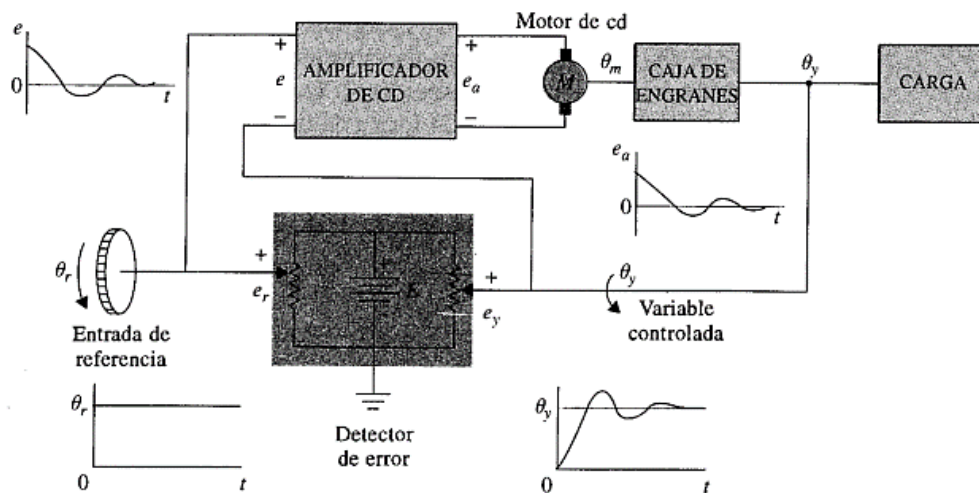
En este caso, las señales en el sistema están moduladas; quiere decir que la información se transmite mediante una señal portadora de CA. Se observa que la variable controlada de salida permanece aún similar a la del sistema de CD. En este caso, las señales moduladas son desmoduladas por la característica de paso bajo del motor de CA.

Los sistemas de control de CA se utilizan en una forma amplia en aeronaves y sistemas de control de misiles, en los que el ruido y las perturbaciones a menudo crean problemas. Al utilizar sistemas de control de CA modulados con una portadora de 400 Hz o mayor, el sistema será menos susceptible a ruido de baja frecuencia.

Los componentes típicos de un sistema de control de CA son: síncronos, giroscopios, acelerómetros, amplificadores de CA, motores de CA, entre otros.

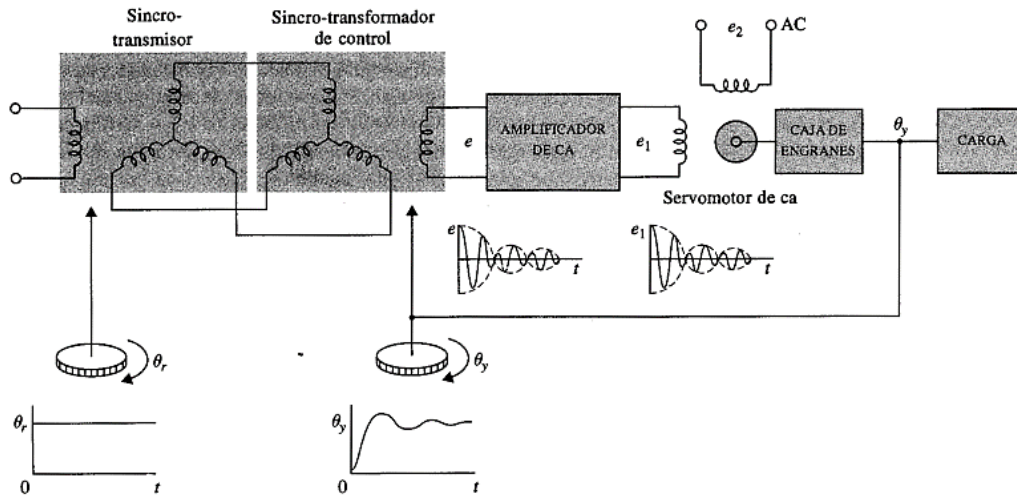
En la práctica, no todos los sistemas de control son estrictamente de CD o CA. Un sistema puede incorporar una mezcla de componentes de CA y CD, empleando moduladores y demoduladores para acoplar las señales en varios puntos del sistema según se requiera.

Figura 8. **Diagrama de un sistema típico CD en lazo cerrado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 17.

Figura 9. **Diagrama de un sistema de control de CA típico en lazo cerrado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 18.

1.1.10.4. **Sistemas de control en tiempo discreto**

Los sistemas de control en tiempo discreto se diferencian de los sistemas de control de tiempo continuo, en que las señales en uno o más puntos del sistema se dan en la forma de pulsos o un código digital.

Normalmente, los sistemas en tiempo discreto se subdividen en sistemas de control de datos muestreados y sistemas de control digital.

Un sistema de control digital se refiere al uso de una computadora o controlador digital en el sistema, de tal forma que las señales están en código digital, tal como un código binario.

Los sistemas de control de datos muestreados se refieren a una clase más general de sistemas en tiempo discreto, en los que las señales están en la forma de pulsos de datos.

En general, un sistema de datos muestreados recibe datos o información solo en forma intermitente en instantes específicos.

Por ejemplo, la señal de error en un sistema de control se puede proporcionar en la forma de pulsos, en cuyo caso el sistema de control no recibe información acerca del error durante los períodos entre dos pulsos consecutivos.

Estrictamente, un sistema de datos muestreados también se puede clasificar como un sistema de CA, ya que la señal del sistema está modulada por pulsos.

Figura 10. **Diagrama de bloques de un sistema de control de datos muestreados**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 18.

La figura 10 ilustra cómo funciona un sistema de datos muestreados una señal continua de entrada $r(t)$ es aplicada al sistema. La señal de error $e(t)$ es muestreada por un dispositivo de muestreo, cuya salida es una secuencia de pulsos. La velocidad de muestreo puede o no ser uniforme.

Existen muchas ventajas al incorporar muestreo en un sistema de control. Una de ellas es que el costoso equipo que se utiliza en el sistema puede ser compartido en tiempo entre varios canales de control.

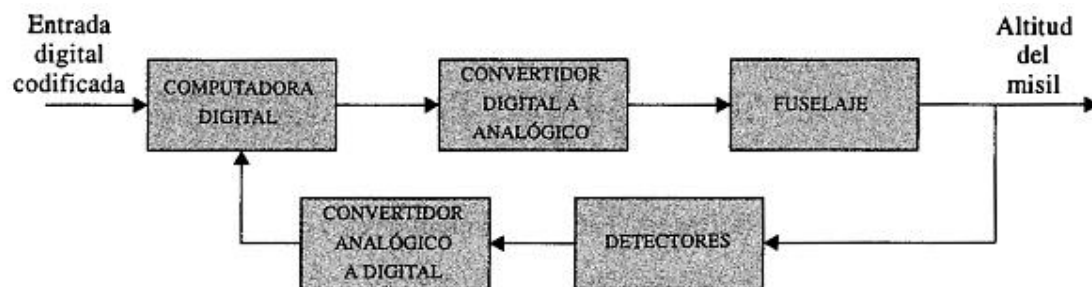
Otra ventaja es que los datos en la forma de pulsos son menos susceptibles a ruido.

El control por computadora se ha hecho muy popular en los últimos años, debido a que las computadoras digitales proveen ciertas ventajas en tamaño y flexibilidad.

Muchos sistemas de aeronaves contienen controladores digitales que a su vez contienen miles de elementos en un espacio no mayor que el tamaño de un libro.

La figura 11 muestra los elementos básicos de un autopiloto digital para el control de un misil guiado.

Figura 11. **Sistema de autopiloto digital para un misil guiado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 19.

1.1.11. Diagramas de bloques

Debido a su simplicidad y versatilidad, los diagramas de bloques se emplean, con frecuencia, por los ingenieros de control para modelar todo tipo de sistemas. Un diagrama de bloques se puede utilizar simplemente para describir la composición e interconexión de un sistema.

O se puede emplear, junto con funciones de transferencia, para describir las relaciones de causa y efecto a través de todo el sistema.

Por ejemplo, el diagrama de bloques de la figura 12 modela un sistema de control de velocidad en lazo abierto de un motor de CD.

En este caso particular, el diagrama de bloques únicamente muestra cómo se conectan los componentes del sistema, y no se proporciona ningún detalle matemático.

Si se conoce la relación matemática y funcional de todos los elementos del sistema, el diagrama de bloques se puede emplear como una herramienta para obtener la solución analítica o por computadora del sistema.

En general, los diagramas de bloques se pueden utilizar para el modelado de sistemas lineales así como el de no lineales.

Por ejemplo: las relaciones entrada-salidas del sistema de control del motor de CD se pueden representar mediante el diagrama de bloques que se muestra en la figura 13.

En la figura, el voltaje de entrada al motor es la salida del amplificador de potencia, el cual, en la realidad, tiene una característica no lineal.

Si el motor es lineal, o de forma concreta se debería decir que si es operado en la región lineal de sus características, su dinámica se puede representar mediante funciones de transferencia.

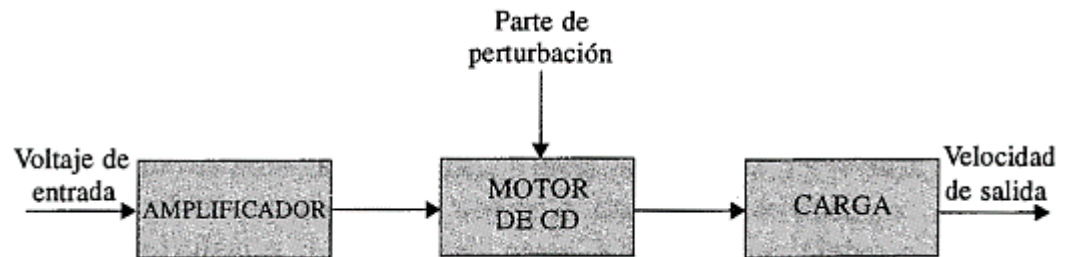
La ganancia del amplificador no lineal se puede describir solamente entre las variables de tiempo $v_i(t)$ y $v_a(t)$, y no existe función de transferencia entre las variables de la transformada de Laplace $V_i(s)$ y $V_a(s)$.

Sin embargo, si la magnitud de $v_i(t)$ está limitada al intervalo lineal del amplificador, este se puede considerar como lineal, y se puede describir por la función de transferencia:

$$\frac{V_a(s)}{V_i(s)} = K \quad (7)$$

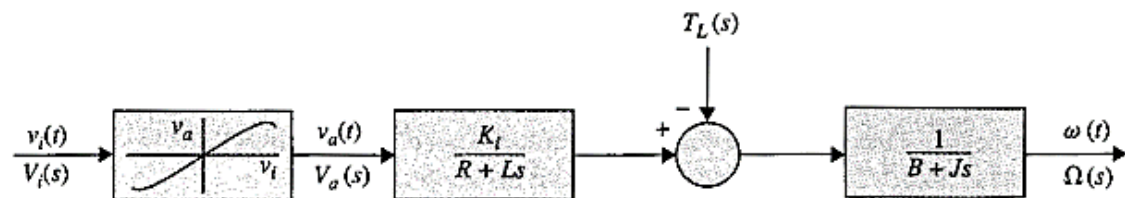
En donde K es una constante que es la pendiente de la región lineal de las características del amplificador.

Figura 12. **Diagrama de bloques de un sistema de control de un motor de CD**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 83.

Figura 13. **Diagrama de bloques con funciones de transferencia y características del amplificador**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 83.

1.1.12. Diagramas de bloques en sistemas de control

Ahora se definirán los elementos del diagrama de bloques empleados frecuentemente en sistemas de control y en el álgebra relacionada.

Uno de los componentes importantes de un sistema de control es el dispositivo detector que actúa como un nodo de unión para la comparación de señales.

Los componentes físicos involucrados son el potenciómetro, amplificador diferencial, multiplicador y otros transductores para procesamiento de señales.

En general, los dispositivos detectores realizan operaciones matemáticas simples como suma, resta, multiplicación no lineal, y algunas veces combinaciones de estas.

Las representaciones en diagrama de bloques de estas operaciones se presentan en la figura 14. Las operaciones de suma y resta de la figura 14 (a), (b) y (c) son lineales, por lo que las variables de entrada y salida de estos elementos del diagrama de bloques pueden ser variables en el dominio del tiempo o variables en términos de la transformada de Laplace.

Por tanto, en la figura 14 (a), el diagrama de bloques implica que:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (8)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (9)$$

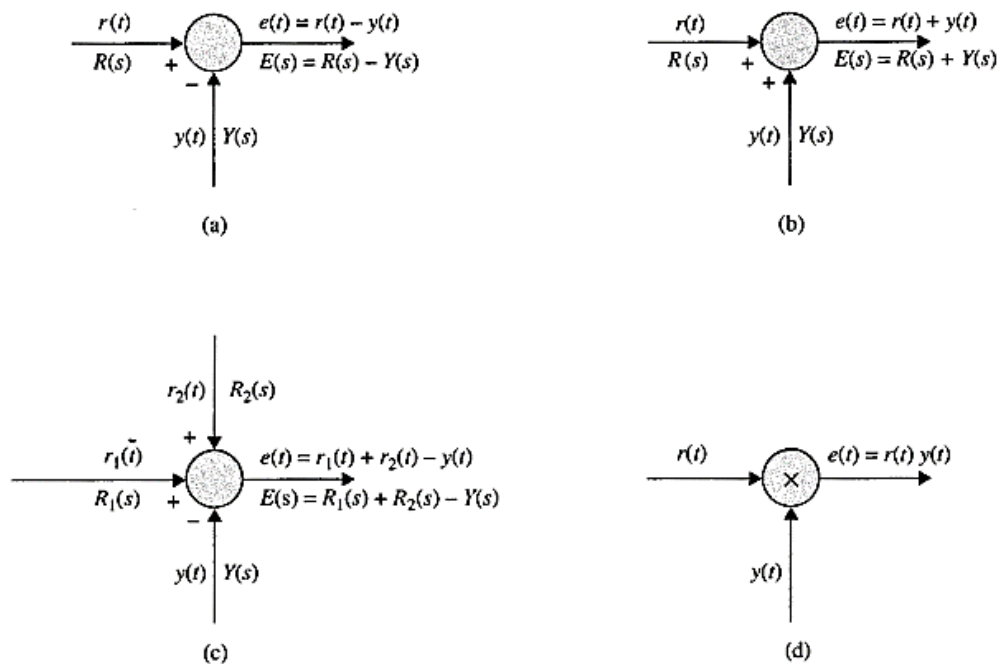
La operación de multiplicación mostrada en la figura 14 (d) es no lineal, por lo que la relación entrada-salida tiene significado solamente en el dominio real (tiempo):

$$e(t) = r(t) \times y(t) \quad (10)$$

Es importante tener en mente que la multiplicación en el dominio real no se traduce directamente al dominio de la transformada de Laplace, por lo que $E(s) \neq R(s) \times Y(s)$.

En lugar de ello, cuando la ecuación 10 se transforma, se debe leer como $E(s) = R(s) * Y(s)$, en donde en este caso el símbolo $*$ representa la convolución compleja de $R(s)$ y $Y(s)$ en el dominio de Laplace.

Figura 14. **Elementos de un diagrama de bloques de dispositivos típicos de detección de sistemas de control (a) función resta, (b) función suma, (c) función suma y resta, (d) multiplicación**

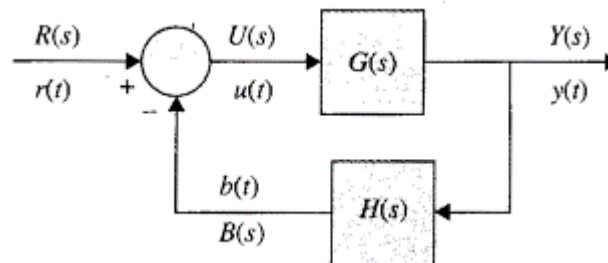


Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 85.

La figura 14 muestra la simbología de un nodo de realimentación. La siguiente terminología se define como referencia al diagrama:

- $r(t), R(s)$ = entrada de referencia (comando)
- $y(t), Y(s)$ = salida (variable controlada)
- $b(t), B(s)$ = señal de realimentación
- $u(t), U(s)$ = señal actuante = señal de error $e(t), E(s)$, cuando $H(s) = 1$
- $H(s)$ = función de transferencia de realimentación
- $G(s)H(s) = L(s)$ = función de transferencia del lazo
- $G(s)$ = función de transferencia de la trayectoria directa
- $M(s) = \frac{Y(s)}{R(s)}$ = función de transferencia en lazo cerrado o función de transferencia del sistema

Figura 15. **Diagrama de bloques básicos de un sistema de control realimentado**



Fuente: KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. p. 86.

La función de transferencia en lazo cerrado $M(s)$ se puede expresar como una función de $G(s)$ y $H(s)$. De la figura 15 se escribe:

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (11)$$

Y

$$B(s) = H(s)Y(s) \quad (12)$$

Al sustituir la ecuación 12 en la ecuación 11 se obtiene:

$$Y(s) = G(s)R(s) - G(s)B(s) \quad (13)$$

Al sustituir la ecuación 11 en la ecuación 12 y resolviendo para $Y(s)/R(s)$ se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado:

$$M(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (14)$$

En general, un sistema de control puede contener más de un lazo de realimentación, y la obtención de la función de transferencia a partir del diagrama de bloques, por medio del método algebraico descrito puede ser tediosa.

Sin embargo, en principio, el diagrama de bloques de un sistema con una entrada y una salida siempre se puede reducir a la forma básica del lazo sencillo de la figura 15, los pasos algebraicos involucrados en el proceso de reducción pueden ser otra vez muy tediosos.

En la figura 15 se muestra que la función de transferencia de cualquier sistema lineal se puede obtener directamente a partir de su diagrama de bloques mediante el empleo de la fórmula de ganancia de la gráfica de flujo de señal.

1.2. Controles PID

El controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo u otro con pequeñas variaciones.

Se implementa de muchas formas diferentes, como un controlador único o como parte de un paquete DDC (Control Digital Directo), o un sistema de control de procesos distribuido jerárquico.

Muchos miles de ingenieros de instrumentación y control de todo el mundo están usando tales controladores en su trabajo diario. El algoritmo PID se puede contemplar desde muchas direcciones diferentes.

Se puede ver como un dispositivo que puede operarse con unas pocas reglas heurísticas, pero que también puede estudiarse analíticamente.

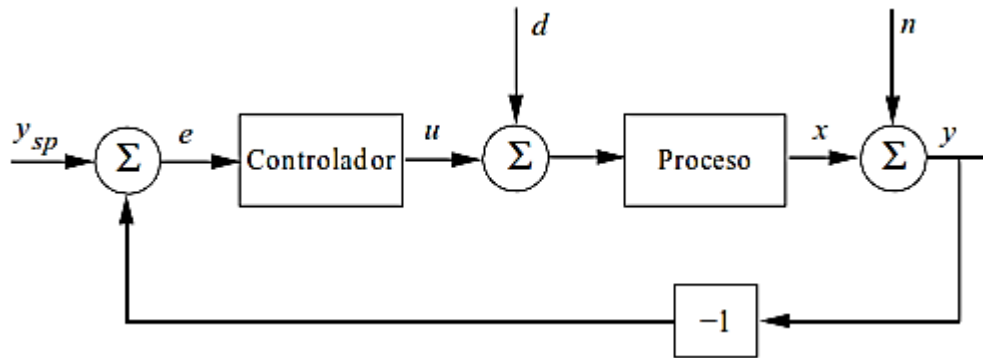
1.2.1. El controlador PID

La versión del algoritmo PID se puede describir como:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (15)$$

Donde u es la señal de control y e es el error de control ($e = y_{sp} - y$). La señal de control es así una suma de tres términos: el término- P (que es proporcional al error), el término- I (que es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional K , el tiempo integral T_i , y el tiempo derivativo T_d .

Figura 16. **Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 68.

1.2.1.1. **Acción proporcional**

En el caso del control proporcional puro, la ley de control dada por la ecuación 15 se reduce a:

$$u(t) = Ke(t) + u_b \quad (16)$$

La acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable u_b es una polarización o un *reset*.

Cuando el error de control e es cero, la señal de control toma el valor $u(t) = u_b$. La polarización u_b a menudo se fija a $(u_{m\acute{a}x} + u_{m\acute{i}n})/2$, pero puede algunas veces ajustarse manualmente de forma que el error de control estacionario es cero en un punto de consigna dado.

Análisis estático: algunas propiedades del control proporcional se pueden comprender por el siguiente aumento, que se basa en consideraciones puramente estáticas.

Sea el lazo de realimentación simple, que se muestra en la figura 16, y que se compone de un proceso y un controlador.

Suponga que el controlador tiene una acción proporcional y que el proceso se modela por el modelo estático donde x es la variable de proceso, u es la variable de control, d es una perturbación de carga, y K_p es la ganancia estática del proceso. Del diagrama de bloques se obtienen las ecuaciones siguientes.

$$x = K_p(u + d) \quad (17)$$

$$y = x + n \quad (18)$$

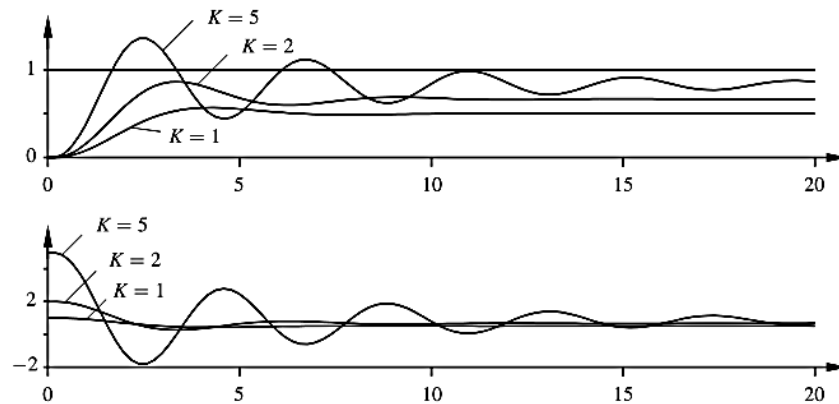
$$x = K_p(u + d) \quad (19)$$

$$u = K(y_{sp} - y) + u_b \quad (20)$$

Donde n es el ruido de medida. La eliminación de las variables intermedias da la siguiente relación entre la variable de proceso x , el punto de consigna y_{sp} , la perturbación de carga d , y el ruido de medida n :

$$x = \frac{KK_p}{1 + KK_p}(y_{sp} - n) + \frac{K_p}{1 + KK_p}(d + u_b) \quad (21)$$

Figura 17. **Simulación de un sistema de lazo cerrado con control proporcional**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 69.

El producto KK_p es un número adimensional llamado la ganancia del lazo. Algunas propiedades interesantes del sistema en lazo cerrado se pueden deducir de la ecuación 19.

En primer lugar suponiendo que n y u_b son cero. Entonces la ganancia de lazo debería ser alta con el fin de asegurar que la salida del proceso x está próxima al punto de consigna y_{sp} .

Un valor elevado de la ganancia del controlador K también hace al sistema insensible a la perturbación de carga d . Sin embargo, si n es distinto de cero, se sigue de la ecuación 19 que el ruido de medida n influye sobre la salida del proceso de la misma forma que el punto de consigna y_{sp} .

Para evitar hacer el sistema sensible al ruido de medida, la ganancia del lazo no debería hacerse demasiado grande.

Incluso la polarización del controlador u_b influye sobre el sistema de la misma manera que una perturbación de carga.

Es por tanto obvio que el diseño de la ganancia del lazo es un compromiso entre diferentes objetivos de control, y que no hay una respuesta simple a cuál es la mejor ganancia de lazo. Esto dependerá del objetivo de control.

También se sigue de la ecuación 19 que habrá normalmente un error en estado estacionario con control proporcional.

Esto se puede deducir intuitivamente de la siguiente observación de la ecuación 17, que el error de control es cero solamente cuando $u = u_b$ en estacionario. El error, por lo tanto, se puede hacer cero en una condición operativa dada por una elección adecuada de la polarización del controlador u_b .

El análisis estático que se acaba de hacer se basa en la hipótesis de que el proceso se puede describir por un modelo estático. Esto omite algunas propiedades importantes de la dinámica del sistema en lazo cerrado.

El más importante es que el sistema en lazo cerrado normalmente será inestable para altas ganancias del lazo si se considera la dinámica del proceso. En la práctica, la máxima ganancia del lazo se determina así por la dinámica del proceso.

Una forma de describir la dinámica del proceso conduce a descripciones como la ecuación 17, donde la ganancia del proceso es dependiente de la frecuencia.

En la figura 17 se ilustra un ejemplo típico de control proporcional. La figura muestra la conducta de la salida del proceso y la señal de control después de un cambio en escalón en el punto de consigna. El error en estado estacionario se puede calcular de la ecuación 19.

El término de polarización u_b , la carga d , y el ruido n son todos cero en la simulación. Con una ganancia del controlador $K = 1$ y una ganancia estática del proceso $K_p = 1$, el error es por lo tanto del 50 por ciento. La figura muestra que el error en estado estacionario disminuye, cuando la ganancia del controlador aumenta tal como lo predice la ecuación 19.

Obsérvese también que la respuesta se hace más oscilatoria cuando aumenta la ganancia del controlador. Esto se debe a los grandes cambios que genera una ganancia elevada.

1.2.1.2. Acción integral

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario.

Con acción integral, un pequeño error positivo conducirá siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error.

El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con acción integral.

Suponiendo que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante (u_0) y un error constante (e_0). Se sigue de la ecuación 15 que la señal de control viene entonces dada por:

$$u_0 = K \left(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t \right) \quad (22)$$

Mientras $e_0 \neq 0$, esto claramente contradice la hipótesis de que la señal de control u_0 es constante. Un controlador con acción integral siempre dará error cero en estado estacionario.

La acción integral se puede también visualizar como un dispositivo, que automáticamente resetea el término de polarización u_b de un controlador proporcional.

Esto se ilustra en el diagrama de bloques de la figura 18, que se muestra un controlador proporcional con un *reset* que se ajusta automáticamente. El ajuste se hace realimentando una señal, que es un valor filtrado de la salida, al punto de suma del controlador.

Esta fue realmente una de las primeras investigaciones de la acción integral, o “reset automático”, tal como se llamó. La implementación que se muestra en la figura 18 se utiliza todavía por muchos fabricantes.

Cálculos sencillos muestran que el controlador de la figura 18 da los resultados deseados. Del diagrama de bloques se obtiene la siguiente ecuación:

$$u = Ke + I = T_i \frac{dI}{dt} + I \quad (23)$$

De donde

$$T_i \frac{dI}{dt} = Ke, \quad (24)$$

Y se encuentra que

$$u = K \left(e + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau \right), \quad (25)$$

1.2.1.3. ¿Qué es un controlador PI?

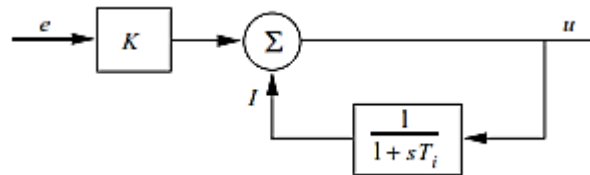
Las propiedades de la acción integral se ilustran en la figura 19, que muestra una simulación de un sistema con control PI. La ganancia proporcional es constante $K = 1$ y se cambia el tiempo integral.

El caso $T_i = \infty$ corresponde a control proporcional puro. Este caso es idéntico al caso $K = 1$ de la figura 17, donde el error en estado estacionario es del 50 por ciento.

El error en estado estacionario se elimina cuando T_i tiene valores finitos. Para grandes valores del tiempo de integración, la respuesta se mueve lentamente hacia el punto de consigna.

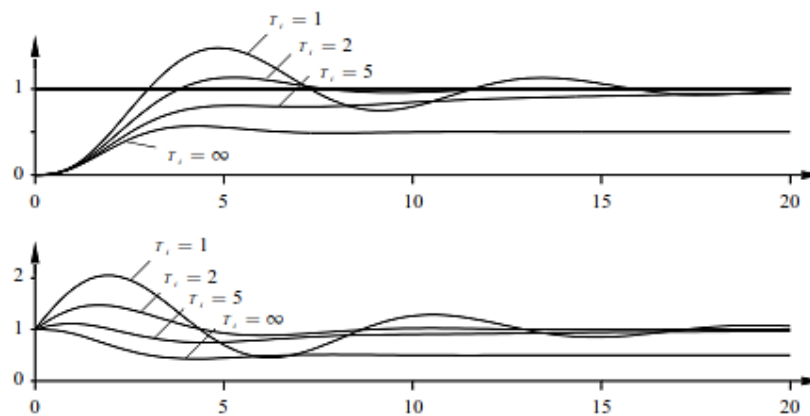
La aproximación es casi exponencial con constante de tiempo T_i / KK_p . Dicha aproximación es más rápida para valores más pequeños de T_i pero es también oscilatoria.

Figura 18. **Implementación de la acción integral como realimentación positiva alrededor de un sistema de primer orden**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 71.

Figura 19. **Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional e integral**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 71.

1.2.1.4. Acción derivativa

El objetivo de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado. La inestabilidad generada en un sistema está ligada directamente al tipo de proceso que se realiza, esto porque cada proceso tiene un tiempo de reacción,

lo que provoca que le lleve algún tiempo al sistema antes de que un cambio en la variable de control sea detectable e la salida del proceso.

Así, el sistema de control tardará en corregir un error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa se puede interpretar como si el control se hiciese proporcional a la salida predicha del proceso, donde la predicción se hace extrapolando el error por la tangente a la curva del error lo cual se muestra gráficamente en la figura 20.

La estructura básica de un controlador PD es:

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (26)$$

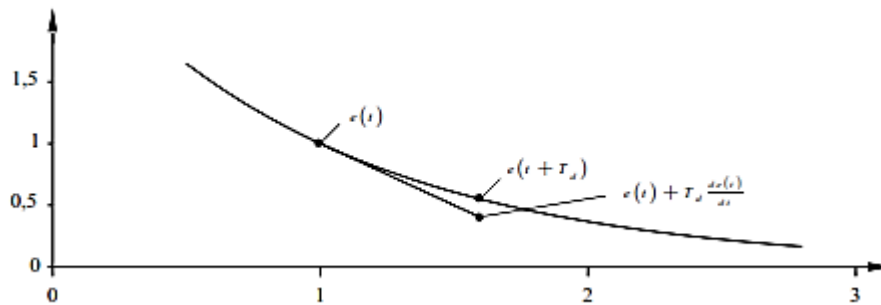
Un desarrollo en serie de Taylor de $e(t + T_d)$ da

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (27)$$

La señal de control es proporcional a una estimación del error de control en el tiempo T_d hacia adelante, donde se obtiene la estimación por extrapolación lineal. En la figura 21 se ilustran las propiedades de la acción derivativa, que muestra una simulación de un sistema con control PID.

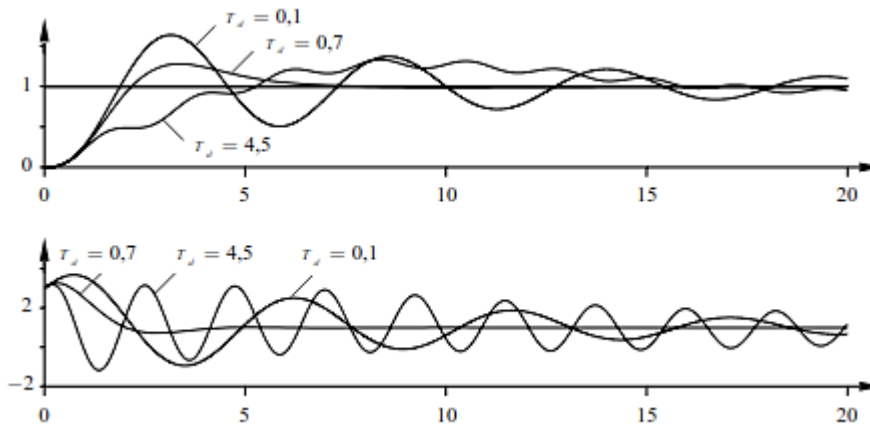
La ganancia del controlador y el tiempo de integración se mantiene constante, $K = 3$ y $T_i = 2$, y se cambia el tiempo derivativo T_d . Para $T_d = 0$ tenemos control PI puro. El sistema en lazo cerrado es oscilatorio con los parámetros escogidos. Inicialmente el amortiguamiento aumenta cuando el tiempo derivativo aumenta, pero disminuye otra vez cuando el tiempo derivativo se hace demasiado grande.

Figura 20. **Interpretación de la acción derivativa como control predictivo, donde la predicción se obtiene por extrapolación lineal**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 72.

Figura 21. **Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional, integral y derivativo**



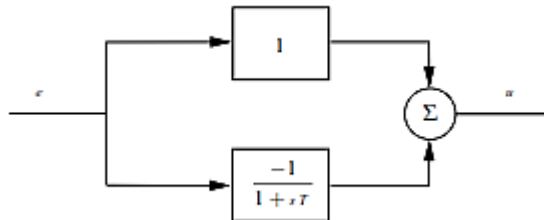
Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 73.

1.2.1.5. Implementación clásica de la acción derivativa

En la figura 18 se mostró que la acción integral originalmente era implementada mediante realimentación positiva, alrededor de un sistema de primer orden. La acción derivativa fue también originalmente implementada utilizando un sistema de primer orden, tal como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 22. La transformada de Laplace de la salida está dada por

$$U(s) = \left(1 - \frac{1}{1 + sT}\right) E(s) = \frac{sT}{1 + sT} E(s) \quad (28)$$

Figura 22. Implementación clásica de la acción derivativa



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 73.

El sistema así tiene la función de transferencia $G(s) = sT/(1 + sT)$. Obsérvese que el filtraje se obtiene automáticamente con esta implementación.

1.3. Método de Ziegler & Nichols

Dos métodos clásicos para determinar los parámetros de controladores PID fueron presentados por Ziegler y Nichols en 1942.

Estos métodos son todavía ampliamente utilizados en su forma original o en algunas de sus modificaciones. A menudo constituyen la base de procedimientos de sintonía utilizados por los fabricantes de controladores y la industria de procesos.

Los métodos se basan en la determinación de algunas características de la dinámica del proceso. Los parámetros del controlador se expresan entonces en términos de estas características mediante fórmulas sencillas.

Es sorprendente que los métodos sean tan ampliamente referenciados porque dan moderadamente buena sintonía solo en situaciones restringidas.

La gran aceptación y uso del método se da por los buenos resultados obtenidos y el hecho de que se puedan usar como ejercicios sencillos para los estudiantes en cursos básicos de control.

1.3.1. El método de la respuesta al escalón

El primer método de diseño presentado por Ziegler y Nichols se basa en obtener información del proceso en la forma de la respuesta a un escalón en lazo abierto.

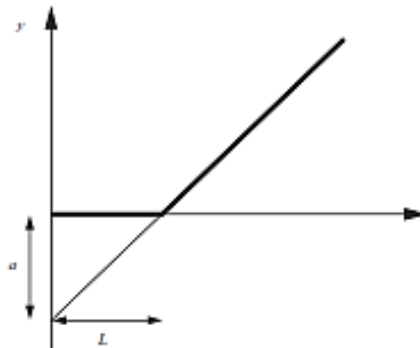
Este método se puede ver como un método tradicional basado en modelado y control donde se utiliza un modelo muy simple del proceso. La respuesta a un escalón se caracteriza por solo dos parámetros a y L , tal como se muestra en la figura 23.

En primer lugar se determina el punto donde la pendiente de la respuesta a un escalón tiene su máximo y se dibuja la tangente en este punto.

Las intersecciones entre la tangente y los ejes de coordenadas dan los parámetros a y L . Esto corresponde a modelar un proceso por un integrador y un retardo de tiempo.

Ziegler y Nichols han dado directamente los parámetros del PID como funciones de a y L . En la tabla 1 se muestran estos valores. Se da también en la tabla una estima del periodo T_p del sistema en lazo cerrado.

Figura 23. **Caracterización de la respuesta en escalón en el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 169.

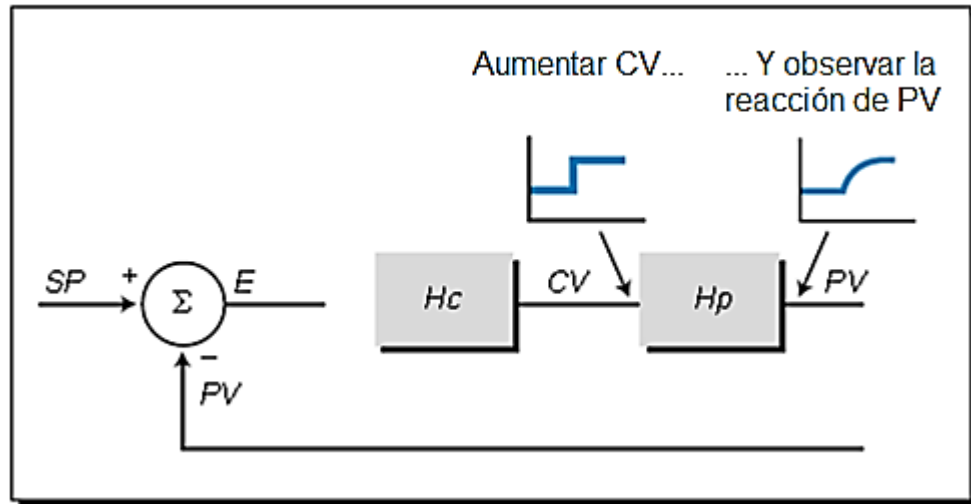
Tabla I. **Parámetros del controlador para el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols**

Controlador	aK	T_i / L	T_d / L	T_p / L
P	1			4
PI	0,9	3		5,7
PID	1,2	2	$L/2$	3,4

Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. p. 169.

El método de lazo abierto de Ziegler-Nichols también es llamado *process reaction method*, en inglés significa método de reacción del proceso, esto es porque el proceso se prueba a través de un lazo abierto para conocer la reacción del proceso con base en los cambios en la salida de la variable de control, dicha respuesta es graficada para poder analizar y obtener las variables reales del sistema. Una vez desarrollada la prueba y obtenidos los datos, estos pueden ser introducidos en las ecuaciones del método Ziegler y Nichols para el control que se desea implementar sea un control P, PI o PID.

Figura 24. **Método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto**



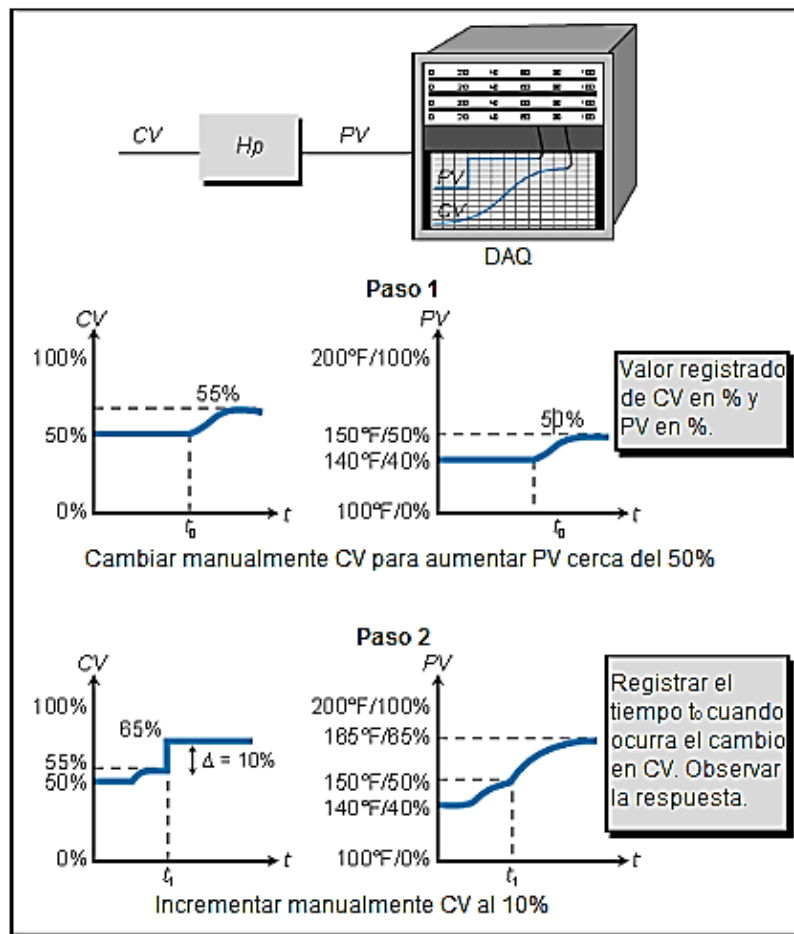
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

Pasos para desarrollar el método de ajuste Ziegler y Nichols en lazo abierto.

- Aumentar CV hasta el 50 %: PV que en sus siglas en inglés significa variable de proceso, es afectada directamente por la CV , variable de control, la diferencia de ambas es que la variable de control puede ser modificada por el controlador según se desee y la variable de proceso es la respuesta física obtenida por el sistema real, añadiendo todas las pérdidas producidas dentro de las máquinas y sensores del sistema.
- Como primer paso es necesario llegar la variable de proceso al 50 % permitiendo que alcance la estabilidad, modificando la variable de control, para ello es necesario contar con un sistema o dispositivo de adquisición de datos y tomar los datos respectivos de la variable de proceso.

- Aumentar la CV un 10 %: una vez realizado el paso 1, dejando estabilizar el sistema, se debe hacer un cambio manual de la CV a un 10 %. Los datos deben ser tomados al momento de realizar el aumento. Observar la respuesta de la variable de proceso. Esta respuesta provee información importante acerca del tiempo de retardo y la razón de cambio de la PV.

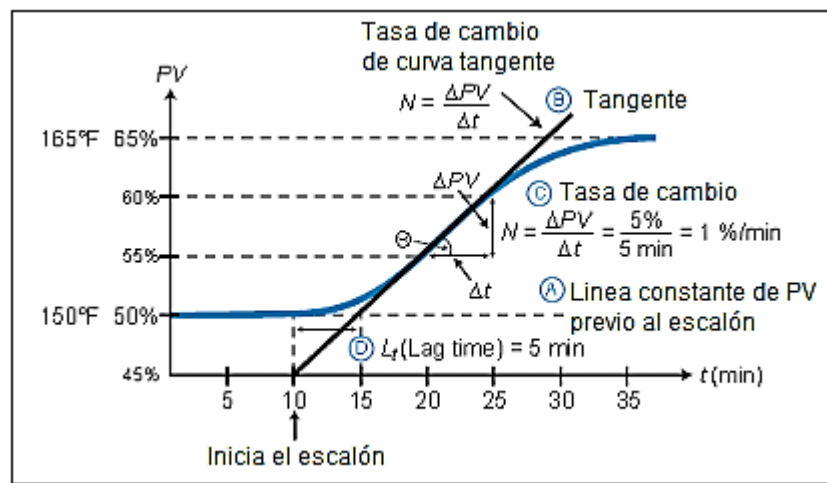
Figura 25. **Pasos 1 y 2 del método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel y Paint.

- Encontrar la razón de cambio: una vez obtenidos los datos del paso anterior, trazar la gráfica del proceso, luego se debe trazar una línea tangente a la curva desde el punto antes del aumentar el 10 % de CV hasta donde PV se estabiliza. La razón de cambio es igual al cambio en la PV con respecto del tiempo. Esto puede ser obtenido trazando un triángulo rectángulo con base en la tangente y obteniendo su ángulo.

Figura 26. **Respuesta de la variable de proceso al cambio de CV**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel y Paint.

- Calcular el tiempo de retardo: para determinar el tiempo de retardo L_t , encuentre el punto en el cual la línea tangente se intersecta con la curva de reacción de PV. Tomar el tiempo entre el punto donde sucedió el aumento de CV, hasta el punto donde la línea tangente se intersecta con la curva de reacción de PV.

- Determinar las constantes de ajuste del lazo: introducir los valores de la razón de cambio y el tiempo de retardo en las ecuaciones de ajuste en lazo abierto de Ziegler-Nichols para el tipo de control apropiado sea P, PI o PID, para calcular las constantes de control, la tabla II muestra las ecuaciones de ajuste para cada sistema respectivamente.

Tabla II. **Ecuaciones del método de ajuste Ziegler-Nichols en lazo abierto**

Tipo de controlador	Constante de lazo sintonizado	Ecuación de sintonía
Proporcional (P)	K_p	$K_p = \frac{\Delta CV}{(L_t)(N)}$
Proporcional-Integral (PI)	K_p T_i	$K_p = \frac{(0.9)(\Delta CV)}{(L_t)(N)}$ $T_i = (3.33)(L_t)$
Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	K_p T_i T_D	$K_p = \frac{(1.2)(\Delta CV)}{(L_t)(N)}$ $T_i = (2)(L_t)$ $T_D = (0.5)(L_t)$

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

2. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS COMPACT WORKSTATION Y ESAYPORT USB PARA LA APLICACIÓN DE LOS CONTROLES PID

Es muy importante conocer los equipos a utilizar en un sistema de control y las características de dichos equipos, para poder manejarlos de manera adecuada y dentro de los rangos específicos para los que fueron creados, ya que una mala administración de los mismos puede provocar no solo fallas sino dañar los equipos.

Por lo tanto, es necesario conocer características básicas como rangos de voltaje, corriente, tipo de corriente y voltaje ya sea alterna o directa, nivel de protección de los equipos, entre otros.

Además, es necesario conocer los conceptos básicos con los cuales son manejados estos equipos.

2.1. Sistema de medida

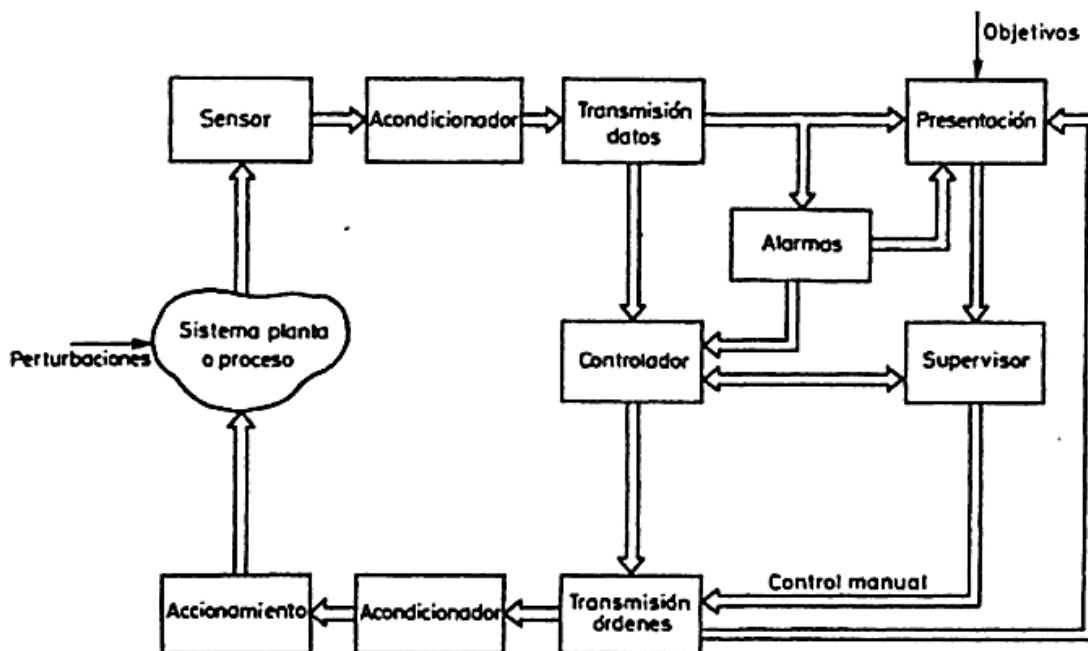
Se le llama sistema de medida al conjunto de dos o más elementos y partes necesarias con el fin de realizar una o varias funciones. En resumen, es la asignación de un valor a una propiedad o cualidad de un objeto o suceso.

Con lo anterior queda decir que dicha medida debe ser independiente del observador, de tal manera que sea objetiva, logrando así una correspondencia entre las relaciones numéricas con las propiedades físicas o eventos medidos.

El propósito de obtener dichas medidas puede ser útil para realizar distintas acciones, como vigilancia o dar un seguimiento del proceso, esto es útil para poder conocer a fondo el proceso o en otros casos para realizar las acciones necesarias y llevar el proceso en una dirección específica y obtener los resultados deseados.

La realización de la medida implica ciertos pasos o procedimientos como lo es la adquisición de la información, la cual se realiza con un elemento sensor o transductor, el procesamiento de dicha información y finalmente la presentación de resultados, de forma que se puedan percibir por los sentidos o que puedan ser tomados por personal en diferentes niveles de proceso.

Figura 27. **Estructura general de un sistema de control**



Fuente: PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. p. 2.

2.2. Transductores, sensores y accionamientos

“Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta”¹.

Según lo descrito anteriormente se puede decir que un transductor se encarga de convertir un tipo de energía en otro.

Se puede tomar en cuenta que al realizar una medición no se extrae energía de la fuente física o de otro modo más concreto, que la energía tomada a través de la medición no es significativa comparada con la magnitud física medida.

Por ejemplo, al medir una fuerza, se supone que el desplazamiento del transductor es despreciable, dicho de otra forma, que no se carga al sistema con lo cual se puede decir que su impacto en la medida es irrelevante, mientras se pueda garantizar que la medición no perturba al sistema.

Cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo a otro tipo de señal física debería de llamarse transductor, por antonomasia se consideran transductores únicamente a aquellos dispositivos que proporcionan una señal de salida de tipo eléctrica.

Los sistemas electrónicos ofrecen entre otras, las siguientes ventajas:

- Debido a la estructura electrónica de la materia, cualquier variación de un parámetro no electrónico de un material, viene acompañada por la variación de un parámetro electrónico. Eligiendo el material adecuado,

¹ Definición de PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. p. 2.

esto permite realizar transductores con salida electrónica para cualquier magnitud física no eléctrica.

- Dado que en el proceso de medida no conviene extraer energía del sistema donde se mide, lo mejor es amplificar la señal de salida del transductor. Con amplificadores electrónicos se pueden obtener fácilmente ganancias de potencia de 10^{10} en una sola etapa, a baja frecuencia.
- Además de la amplificación, hay una gran variedad de recursos, en forma de circuitos integrados, para acondicionar o modificar las señales eléctricas. Incluso hay transductores que incorporan físicamente en un mismo encapsulado parte de estos recursos.
- Existen también numerosos recursos para presentar o registrar información si se hace electrónicamente, pudiéndose manejar no solo datos numéricos, sino también textos, gráficos y diagramas.
- La transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas, y si bien no hay que olvidar que estas pueden ser más convenientes en determinadas circunstancias, como puede ser la presencia de radiaciones no ionizantes o atmósferas explosivas, en muchos casos estos sistemas han sido sustituidos por otros electrónicos.

En un sistema de control también se encuentra el término sensor, que es muy similar a lo descrito anteriormente como transductor, un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible, que es función de la variable medida.

Frecuentemente se han tomado los términos de sensor y transductor como sinónimos, pero sensor es un término más extenso, es un dispositivo utilizado para percibir cantidades físicas que por su naturaleza no son posibles de adquirir directamente por los sentidos, finalmente se puede diferenciar ambos términos con especificar el tipo de transductor usado, dado que pueden ser transductores de salida o transductores de entrada.

Un transductor de entrada acomoda una señal física y la transforma en una señal eléctrica, lo que puede ser bien descrito como un sensor, mientras que un transductor de salida transforma una señal eléctrica a otra señal de tipo físico, de esto se puede nombrar adecuadamente de la siguiente forma: al transductor de entrada se le puede llamar sensor, dado que se pretende la obtención de información mientras que al transductor de salida se le puede llamar actuador, porque lo que buscan es la conversión de energía, estos términos son los más aceptados particularmente en el campo de la robótica.

2.2.1. Acondicionamiento y presentación

Los acondicionadores de señal son elementos del sistema de medida que se encargan de tomar las señales de salida de los sensores y proporcionan una señal apta para ser presentada, registrada o utilizada posteriormente, para algún procesamiento desarrollado por otro equipo o instrumento.

Básicamente la función de acondicionamiento es mostrar una señal que pueda ser leída o procesable para su uso. Los acondicionadores de señal consisten en circuitos electrónicos que se encargan de desarrollar las siguientes acciones: amplificar, filtrar, modular, desmodular o adaptar impedancias.

Los términos acondicionamiento y procesamiento, son muy difíciles de definir dado que están relacionados, pero puede decirse que acondicionamiento es modificar la señal eléctrica obtenida del sensor para su mejor utilización, sin salir del dominio eléctrico o en casos específicos, del dominio analógico.

El acondicionamiento es el procesamiento de señales antes de su utilización final, lo que compete al proceso es hacer uso de la información obtenida, de modo que con esta señal se pueden tomar acciones determinadas según las señales obtenidas.

Dominio de datos se define como el nombre de una magnitud mediante la cual se representa o transmite información. El dominio analógico posee su información en la amplitud de la señal que puede ser corriente, tensión, potencia o carga. El dominio temporal tiene su información en las relaciones temporales como período, frecuencia, anchura de pulsos o fase.

En general se puede decir que el dominio analógico es el más susceptible a cualquier interferencia eléctrica, en el caso del dominio temporal la variable codificada no se puede convertir al dominio de números de forma continua, sino que es necesario esperar que se complete un ciclo o la duración de un pulso.

2.2.2. Tipos de sensores

Los sensores pueden clasificarse de diferentes formas, según las características o los fenómenos que se desean medir.

Según el aporte de energía, se pueden dividir en modulares y generadores. Los sensores moduladores o activos obtienen su señal de salida de una fuente

auxiliar, mientras que los sensores generadores la energía de salida es suministrada por la entrada.

Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los analógicos la salida es variante y se da de forma continua. En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos, la transmisión de su salida es fácil dado que no requiere una conversión análogo/digital.

Según el modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de deflexión o de comparación. En los sensores de deflexión, la magnitud medida produce algún efecto físico sobre el sensor, que luego se relaciona con una variable que sea de utilidad según el caso.

Los sensores por comparación se basan en tomar una medida con base en un patrón designado, este sensor suele ser más exacto dado que se puede calibrar con una referencia de calidad.

Este sensor basado en el desequilibrio, mide alrededor de cero, por lo tanto, suele ser muy sensible, como punto en contra, este sensor no cuenta con una respuesta tan rápida como el de deflexión, de manera que el sensor a utilizar debe ser seleccionado según las necesidades del sistema en cuanto a rapidez en la toma de datos o exactitud.

Según el tipo de relación entrada y salida, los sensores pueden ser de orden cero, de primer orden, de segundo orden, o de orden superior. El número de orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía, lo cual repercute en su exactitud y velocidad de respuesta.

De una manera más general, los sensores pueden ser clasificados según la magnitud medida, esta clasificación puede ser exhaustiva puesto que la cantidad de magnitudes a medir pueden llegar a ser prácticamente inagotables. Algunos ejemplos de sensores clasificados por magnitud medida, pueden ser: presión, temperatura, humedad, caudal, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, entre otros.

En la tabla III se resume la clasificación de sensores según su criterio y clases.

Tabla III. **Clasificaciones de los sensores**

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

Fuente: PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. p. 7.

2.2.2.1. Sensor ultrasónico

Los sensores ultrasónicos son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8 m.

El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar.

Estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración.

Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores superficies y diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo, han de ser deflectores de sonido.

Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco.

Este sensor, al no necesitar el contacto físico con el objeto, ofrece la posibilidad de detectar objetos frágiles, como pintura fresca, además detecta cualquier material, independientemente del color, al mismo alcance, sin ajuste ni factor de corrección.

El problema que presentan estos dispositivos son las zonas ciegas y el problema de las falsas alarmas.

La zona ciega está comprendida entre el lado sensible del detector y el alcance mínimo en el que ningún objeto puede detectarse de forma fiable.

La información técnica de un sensor ultrasónico es importante, esto porque con esa información se pueden conocer la capacidad de medición, así como interpretar las señales eléctricas enviadas por un sensor, ya sea en voltios o amperios, un sensor ultrasónico enviará en respuesta a una medición, una señal eléctrica, la cual debe ser interpretada por el autómata.

A continuación se presentan los datos del sensor utilizado:

- Programado con curva característica descendente.
- Margen de medición de 48 a 270 mm.

- Salida analógica: 0 a 10 V.
- Tipo de protección IP 67.
- Incluye cable y elementos de fijación para el montaje en la tapa de un depósito.

Figura 28. **Sensor ultrasónico utilizado en el proceso de control de nivel**



Fuente: Festo. *Sensor de ultrasonidos*. <http://www.festo-didactic.com/es-es/productos/automatizacion-de-procesos/edukit-pa/sensor-de-ultrasonidos.htm?fbid=ZXMuZXMuNTQ3LjE0LjE4LjExMTguNjU4OA&basket=add&vid=8712>. Consulta: enero de 2015.

2.2.2.2. Sensor de flujo o caudal

El sensor de flujo es un instrumento utilizado para la medición de un fluido en una tubería, instalado en serie con la tubería en cuestión, puede medir el flujo de un líquido o gas y proporcionar una señal eléctrica analógica dentro de un rango determinado por el rango de medición, por ejemplo, un sensor de flujo para

un rango de 0,3 a 9,0 litros por segundo, da un valor mínimo medible dentro del grado de exactitud especificado por el fabricante y el valor máximo a medir, lo cual se vuelve una señal eléctrica de 40 a 1 200 hertzios.

Existen diferentes tipos de construcción en cuanto a sensores de flujo, el utilizado en el desarrollo del control PID es un sensor de flujo de tipo molino. Sus partes mecánicas consisten en un molino con aspas transversales a la circulación de flujo, el molino tiene en un extremo un imán permanente.

Cuando este imán gira, genera un campo magnético variable que es leído por un sensor de efecto de campo magnético, sensor de efecto Hall, después el circuito electrónico lo convierte en pulsos que transmite a través de un cable.

La información técnica de un sensor es de suma importancia para poder trazar los rangos correspondientes a los datos obtenidos, es decir, para poder utilizar un sensor adecuadamente se debe conocer el rango de voltaje mínimo y máximo de funcionamiento, que responde a la medición mínima medible y la máxima medible, de manera que al conocer el voltaje que se obtiene de dicho sensor, se puede conocer la medición física.

En el caso del sensor de caudal, conocer los litros por minuto según sea en este caso particular, la frecuencia obtenida, dado que se obtiene el caudal a través de pulsos generados por las aspas internas del sensor.

A continuación se detallan los datos del sensor:

- Sensor de caudal con rotor y evaluación optoelectrónica, infrarrojo
- Margen de medición: 0,3 – 9,0 l/min
- Gama de frecuencias (salida): 40 – 1 200 Hz

- Tensión de funcionamiento admisible: 8 – 24 VCC
- Consumo de corriente: 18 – 30 mA
- Carga máx.: 2,2 kOhm
- Factor K, impulsos/dm³: 8 000
- Conexión eléctrica: cable de 3 polos
- Incluye transformador de medición de frecuencia/tensión y cable

Figura 29. **Sensor de caudal utilizado en el proceso de control de flujo**



Fuente: Festo. *Sensor de caudal para EduKit PA incl. transformador de medición.*
<http://www.festo-didactic.com/int-es/learning-systems/automatizacion-de-procesos/edukit-pa/sensor-de-caudal-para-edukit-pa-incl.-transformador-de-medici-oacute-n.htm?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xOC4xMTE4LjY3NTM>. Consulta: enero de 2015.

DAQ

Es un término utilizado para nombrar a los equipos de adquisición de datos, por sus siglas en inglés *data acquisition*. La adquisición de datos es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico, como: voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido.

Un sistema DAQ consiste en sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable.

Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC estándares en la industria, proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

Figura 30. **Sistema DAQ en bloques**



Fuente: *Partes de un Sistema DAQ*. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.

Consulta: enero de 2015.

2.3. **EasyPort USB**

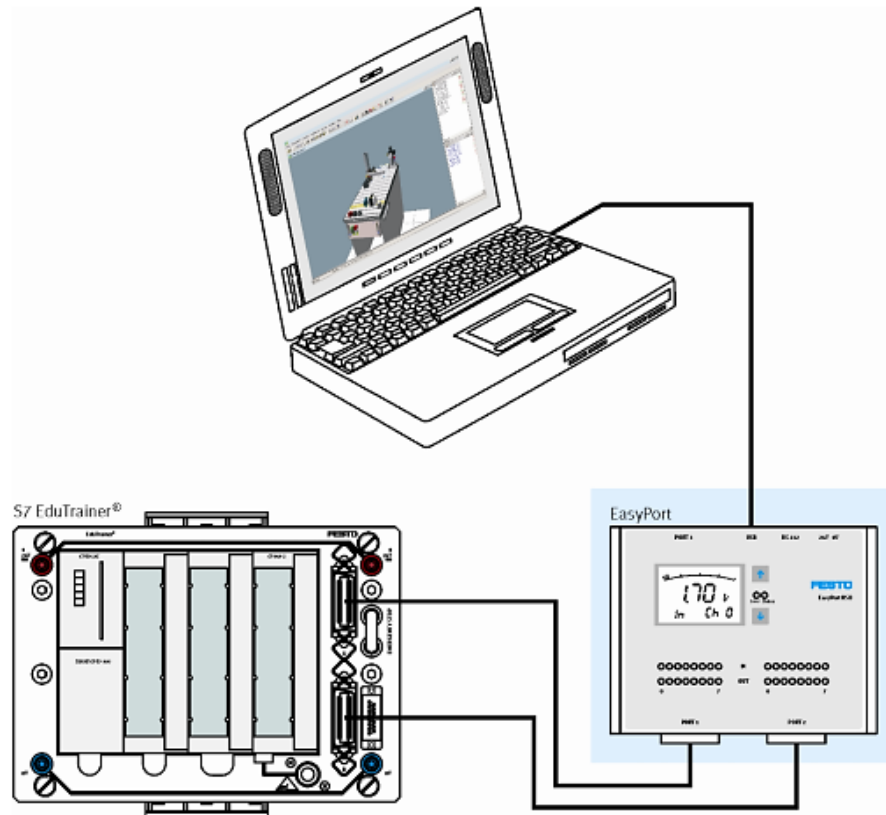
Esta interface de procesos de la marca Festo, está diseñada para la adquisición de señales de sensores, la cual es procesada y enviada a una PC para su uso correspondiente, también cuenta con generación de señales para control de procesos, por lo que su transmisión de señales es bidireccional para aplicarse a un proceso de control real en técnica de bajo voltaje, 24 VDC y una PC.

Para reducir las interferencias generadas por el o los sistemas medidos se utilizan interfaces galvánicamente separadas, para realizar la transmisión de datos entre EasyPort USB y el PC.

EasyPort USB cuenta con numerosas utilizaciones posibles:

- Control de un proceso de control real mediante un sistema de control que funciona en el PC.
- Control de un modelo de proceso simulado mediante un PLC real.
- Regulación de un proceso real; la regulación funciona en el PC.
- Captación y evaluación de datos de medición provenientes de un proceso real.

Figura 31. **Ejemplo de aplicación, configuración con un proceso simulado y un PLC real**



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 6.

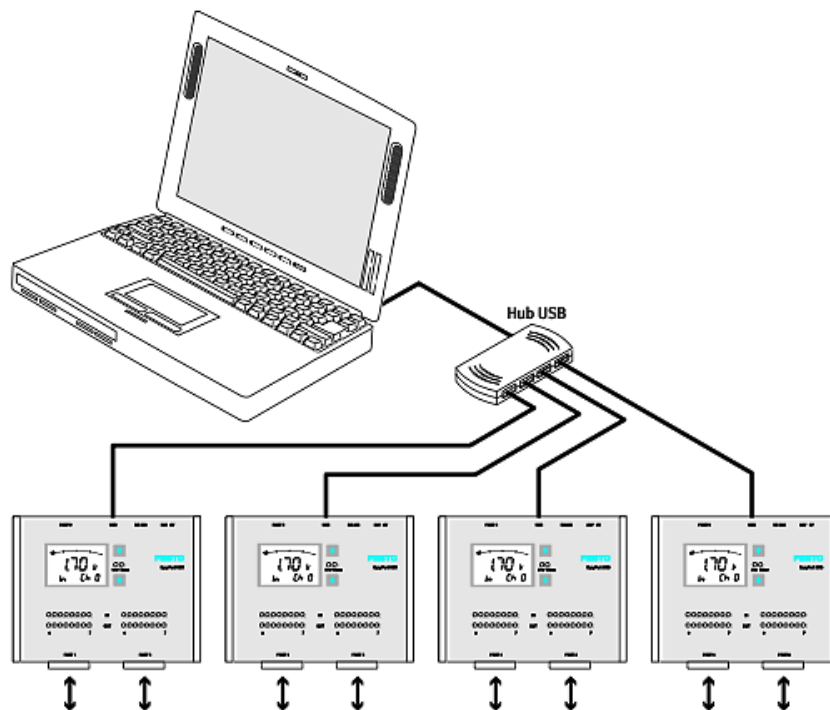
El trabajo realizado por el EasyPort USB es unir el mundo real con el mundo virtual del PC.

La interface de procesos EasyPort USB cuenta con 16 entradas y salidas digitales, así como de 4 entradas analógicas y 2 salidas analógicas.

En el caso de utilizar un distribuidor (*hub*) de puertos USB conectado a un PC o en los puertos USB del propio PC, se tiene una capacidad máxima de cuatro

módulos EasyPort USB. Con esto se debe tener en cuenta que las direcciones de los módulos son diferentes.

Figura 32. **Configuración con cuatro módulos EasyPort USB**



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 7.

Para transmitir las señales de los procesos entre el EasyPort USB y el software del PC se dispone del server OPC EzOPC o del elemento de control ActiveX del EasyPort USB.

La utilización el EasyPort puede ser muy variada, los siguientes son algunos ejemplos.

Procesos de control reales posibles:

- Un proceso de automatización con actuadores y detectores
- Un PLC real
- Una caja de simulación





También puede disponerse de diversos programas de software para el mundo virtual. Se trata de programas para los siguientes fines:

- Control
- Regulación
- Captación de valores de medición
- Visualización

En esas configuraciones preparadas es muy sencillo utilizar EasyPort USB.

La siguiente tabla obtenida del manual de EasyPort USB, detalla las distintas aplicaciones que se pueden realizar.

Tabla IV. Ejemplos de aplicación con EasyPort USB

Control de un proceso real	Control de un proceso simulado	Medir	Regular
<p>Software utilizado para tareas de control de procesos:</p> <ul style="list-style-type: none"> – FluidSim® (sólo digital) – S7-PLCSIM – CoDeSys Soft-SPS 	<p>Software utilizado para tareas de simulación de procesos:</p> <ul style="list-style-type: none"> – EasyVeep® – FluidSim® – CIROS® 	<p>Software utilizado para tareas de captación de datos de medición:</p> <ul style="list-style-type: none"> – FluidLab® PA – FluidLab® P – FluidLab® H 	<p>Software utilizado para tareas de regulación:</p> <ul style="list-style-type: none"> – FluidLab® PA – FluidLab® P a partir de V. 2.0
<p>Interface EasyPort USB:</p>  <p>Interface digital/analógica</p> <p>El EasyPort USB es la interface entre el PC y el proceso real. El proceso se controla desde el PC.</p>	<p>Interface EasyPort USB:</p>  <p>Interface digital</p> <p>El EasyPort USB es la interface entre el PC y el PLC. El PLC controla en el PC el proceso simulado.</p>	<p>Interface EasyPort USB:</p>  <p>Interface digital/analógica</p> <p>El EasyPort USB es la interface entre el PC y los detectores reales.</p>	<p>Interface EasyPort USB:</p>  <p>Interface digital/analógica</p> <p>El EasyPort USB es la interface entre el PC y el tramo real de regulación.</p>
<p>Proceso real:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Caja de simulación, digital/analógica – MPS® PA – MPS® – TP301 	<p>Control real:</p> <ul style="list-style-type: none"> – SPS indistinto – Caja de simulación, digital – SPS EduTrainer® – SPS Board 	<p>Detectores reales:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Caja de simulación, digital/analógica – MPS® PA – TP210 – TP610 	<p>Tramo real de regulación:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Caja de simulación, digital/analógica – MPS® PA – TP210 – TP610

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 177.

EasyPort USB como todo equipo utilizado en la industria de la automatización, debe ser manejado con profesionalismo dado que es un equipo de alta capacidad y múltiples aplicaciones, no deben dejarse de lado las características del equipo en cuanto a conectividad, tensión de funcionamiento,

conexión correcta del equipo, así como utilizar los cables de conexión recomendados por el fabricante para eliminar todo posible caso de falla generado por negligencia o uso de accesorios que no están diseñados para el equipo.

Es de conocimiento general que el uso de accesorios inadecuados puede mermar la capacidad del equipo, además de producir fallas mayores hasta llegar a la pérdida del equipo, la siguiente tabla contiene datos generales sobre el equipo.

Tabla V. **Datos técnicos generales de EasyPort USB**

Interface de procesos EasyPort USB D16A	
Tensión de funcionamiento	24 VDC +/-10%
Consumo	3 VA
Cantidad de salidas	16 digitales de 24 VDC, 2 analógicas de 0...10 VDC ó -10...+10 VDC, resolución de 12 bit
Carga admisible	0,7 A por salida digital 10 mA por salida analógica
Protección contra cortocircuitos	Sí
Cantidad de entradas	16 digitales de 24 VDC, 4 analógicas de 0...10 VDC ó -10...+10 VDC, resolución de 12 bit
Umbral de conmutación de las entradas digitales	12 VDC
Histéresis de las entradas digitales	3 V
Filtro	5 ms
Cantidad de contadores	2 entradas utilizables como contadores rápidos, $f_{\text{máx}} = 20 \text{ kHz}/U_{\text{in}} = 5...24 \text{ VDC}$
Interfaces de comunicación	RS232, con separación galvánica USB2.0, con separación galvánica
Protocolo	ASCII, 115,2 kBaud,8,N,1

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 183.

Tabla VI. **Datos técnicos generales de EasyPort USB (continuación)**

Interface de procesos EasyPort USB D16A	
Clase de protección	IP20
Símbolo CE	Según directiva UE/CEM
Temperatura ambiente admisible para funcionamiento/almacenamiento	0...55 °C/0...70 °C
Medidas en mm (largo x ancho x alto)	135 x 167 x 37
Peso en kg	0,65

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 184.

Las 8 entradas digitales y 8 salidas digitales del EasyPort USB están conectadas según IEEE 488 a un conector tipo zócalo de 24 contactos SysLink. Además, la entrada 0 en el puerto 1 o en el puerto 2 puede utilizarse como entrada de conteo rápido. Las entradas de conteo pueden funcionar con niveles de tensión desde 5 hasta 24 VDC.

Tabla VII. **Datos técnicos de la interface SysLink para señales digitales**

Conector tipo zócalo IEEE 488 de 24 contactos			
Puerto 1	Contacto	Puerto 2	Contacto
OUTPUT 0	1	OUTPUT 0	1
OUTPUT 1	2	OUTPUT 1	2
OUTPUT 2	3	OUTPUT 2	3
OUTPUT 3	4	OUTPUT 3	4
OUTPUT 4	5	OUTPUT 4	5
OUTPUT 5	6	OUTPUT 5	6
OUTPUT 6	7	OUTPUT 6	7
OUTPUT 7	8	OUTPUT 7	8
INPUT 0	13	INPUT 0	13
INPUT 1	14	INPUT 1	14
INPUT 2	15	INPUT 2	15
INPUT 3	16	INPUT 3	16
INPUT 4	17	INPUT 4	17
INPUT 5	18	INPUT 5	18
INPUT 6	19	INPUT 6	19
INPUT 7	20	INPUT 7	20
0 VDC	11/12/ 23/24	0 VDC	11/12/ 23/24
24 VDC	9/10/ 21/22	24 VDC	9/10/ 21/22

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 185.

Las cuatro entradas analógicas y las 2 salidas analógicas del EasyPort USB están conectadas a un conector Sub D tipo zócalo de 15 contactos. La transformación analógica/digital se realiza con una resolución de 12 bit. La frecuencia de exploración es de 0,5 kHz.

Tabla VIII. **Datos técnicos del conector Sub B tipo zócalo, para señales analógicas**

Conector tipo zócalo Sub D de 15 contactos	
Puerto 3	Contactos
OUTPUT 0	1
OUTPUT 1	2
0 V	3
(Libre)	4
(Libre)	5
0 V	6
INPUT 1	7
INPUT 2	8
(Libre)	9
(Libre)	10
+10 VDC REF	11
(Libre)	12
(Libre)	13
INPUT 3	14
INPUT 4	15

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 186.

El intercambio de datos con el PC se realiza a través del puerto serie RS232 o a través del puerto USB de EasyPort USB. La velocidad de la transmisión de datos es de 115,2 kBaud.

Tabla IX. **Datos técnicos de la interface RS232**

RS232 Conector Sub D tipo zócalo, de 9 contactos	=	Contactos
(Libre)		1
Recibir datos	RxD	2
Enviar datos	TxD	3
(Libre)		4
Masa de señales	SGnd	5
(Libre)		6
(Libre)		7
(Libre)		8
(Libre)		9

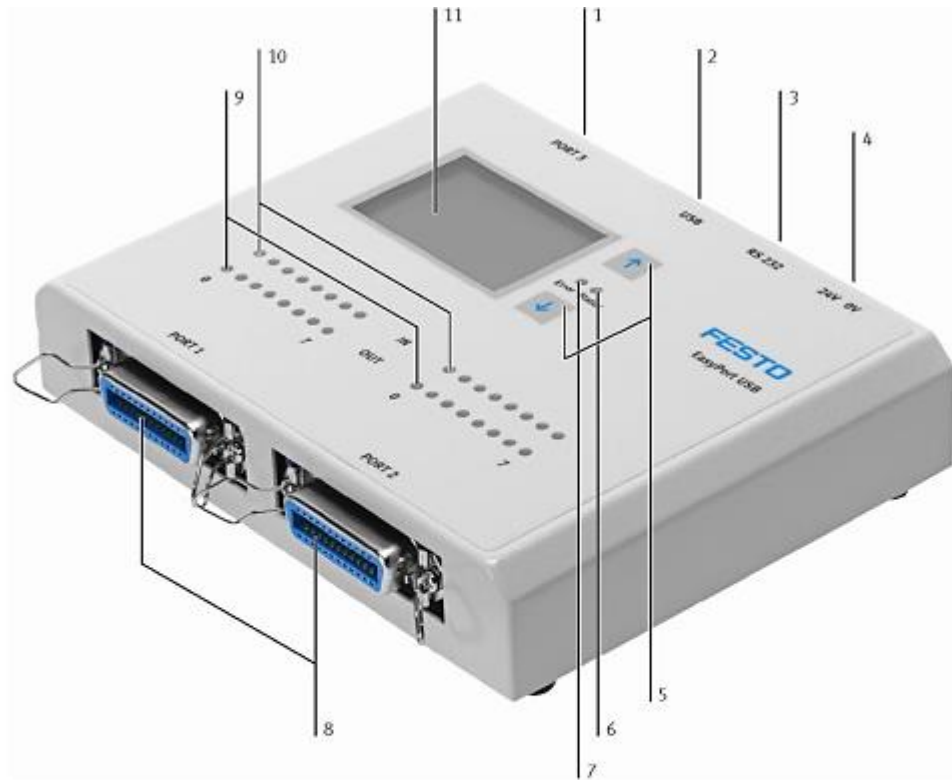
Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 187.

Para realizar la conexión a un PC puede utilizarse un cable prolongador de conexión en serie de 9 contactos de venta comercial. EasyPort USB cuenta con una interface USB 2.0 con separación galvánica.

Para conectar el EasyPort USB al puerto USB del PC o de un *hub*, deberá utilizarse el cable USB A-B.

La alimentación de 24 VDC para el EasyPort USB es externa. La conexión puede realizarse a través de los puertos 1 y 2 o mediante dos bornes roscados separados, que se encuentran en la parte posterior del EasyPort USB.

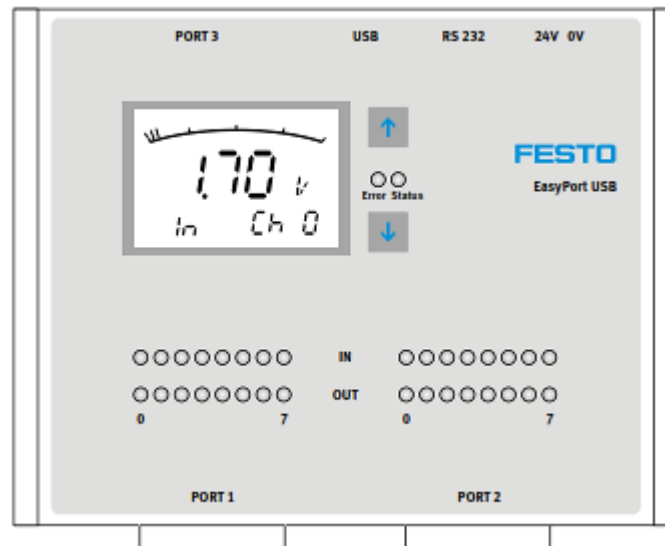
Figura 33. Composición del EasyPort USB



- | | |
|--|--|
| (1) Conector Sub D (puerto 3) | (2) Puerto USB |
| (3) Interface RS232 | (4) Bornes roscados por separado, para alimentación de corriente eléctrica |
| (5) Teclas ↑ ↓ | (6) LED STATUS (verde) |
| (7) LED ERROR (rojo) | (8) Interfaces SysLink (puerto 1 y puerto 2) |
| (9) LEDs para indicación del estado de las salidas digitales (amarillos) | |
| (10) LEDs para indicación del estado de las entradas digitales (verde) | |
| (11) LCD de indicación para señales analógicas y dirección del EasyPort | |

Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 190.

Figura 34. **Panel de mandos e indicación del EasyPort USB**



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 192.

El panel de mandos del EasyPort USB, contiene lo siguiente:

- Led error, si se detecta un cortocircuito en una de las salidas, se enciende el led error. En ese caso, se desconectan las salidas del EasyPort USB. Al conectar el EasyPort USB, se enciende este led brevemente. Se apaga durante el *test* de conexión.
- Led *status*, de color verde indica dos estados:
 - Parpadeo con frecuencia de 1 Hz, estado después de la conexión, el módulo EasyPort USB todavía no comunica.
 - Parpadeo pulsante, se ha definido la dirección del módulo EasyPort USB, la dirección se muestra cada 2 segundos mediante una

determinada cantidad de señales luminosas que se encienden brevemente.

- LCD de indicación, en la primera línea se muestran las tensiones de entrada y salida de la señal analógica seleccionada mediante un valor y, adicionalmente, se muestra un diagrama de barras, en la segunda línea se indican el número del canal y el sentido de la señal.

Significados: In = señal de entrada, Out = señal de salida

- LED IN 0...7, indicación de estado de las entradas digitales mediante LED verdes.
- LED OUT 0...7, indicación de estado de las salidas digitales mediante LED amarillos.
- Teclas, con la flecha hacia abajo se selecciona el canal análogo que consta en el LCD, el número de canal como señal de entrada puede ser de 0 a 3 y el número de canal como señal de salida puede ser de 0 a 1.
- Con la tecla hacia arriba pueden seleccionarse diversas magnitudes físicas, puede escogerse entre: V, bar, PSI, MPa, l/min, °C, pulsando simultáneamente ambas teclas se activa el ajuste de la dirección.

Para poner en funcionamiento el EasyPort USB se necesita lo siguiente:

- El EasyPort USB.
- Una unidad de alimentación eléctrica de 24 VDC.

- Un PC si se desea evaluar los datos del EasyPort USB.
- El CD-ROM de EasyPort para la instalación de los controladores USB en el PC.
- El cable USB

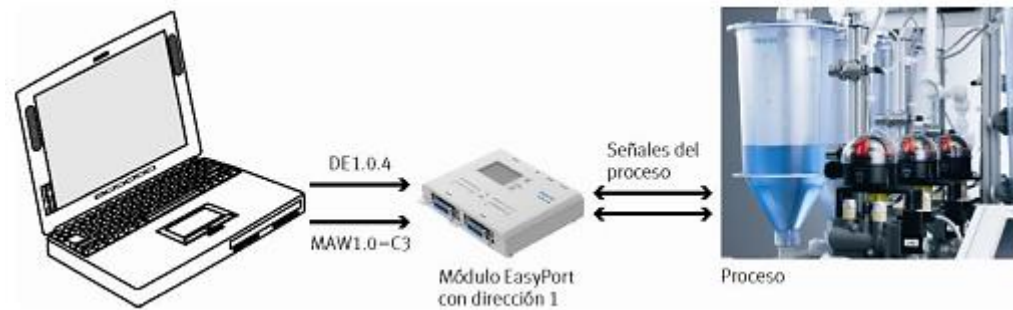
Ayuda útil

- La aplicación de demostración de EasyPort, para establecer rápidamente y de manera sencilla una conexión con el EasyPort USB.
- Una caja de simulación, para generar de manera sencilla señales de proceso para EasyPort USB.

2.3.1. Comunicación con EasyPort USB

La transmisión de datos desde y hacia una interface de procesos EasyPort USB, se lleva a cabo mediante órdenes de escritura y lectura individuales, atribuidas a determinadas direcciones.

Figura 35. Órdenes de escritura y lectura en modo de terminal



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 194.

Dependiendo cómo se incluye el EasyPort USB en la aplicación, existen diversos niveles de acceso para ejecutar esas órdenes de escritura/lectura.

- Intérprete de órdenes, es el nivel más bajo y se accede a él directamente mediante un programa de terminal.
- Elemento de control ActiveX, describe las funciones de acceso y, por lo tanto, es la interface de programación para el EasyPort USB.
- EzOPC, es un server OPC y establece la conexión de comunicación con productos de Festo Didactic para aplicaciones preparadas. OPC significa *open connectivity via open standards* y se trata de una interface estándar utilizada en el sector de la automatización. Esta interface garantiza un eficiente flujo de datos entre aplicaciones de Windows y aparatos de automatización.

2.3.2. Estructura de órdenes

Existen dos órdenes centrales para leer y escribir:

- Orden Display (D) para leer un elemento
- Orden Modify (M) para modificar un elemento

Los elementos de un EasyPort USB pueden ser los siguientes:

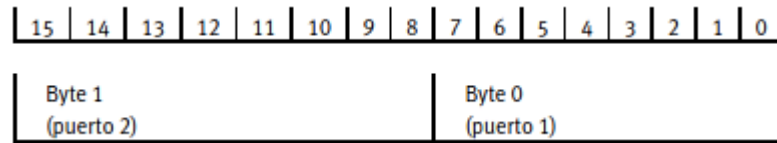
- Entrada (E)
- Salida (A)
- Temporizador de operaciones (T)
- Contador rápido (C)

El elemento puede activarse como:

- Bit
- *Byte* (B)
- Palabra (W)

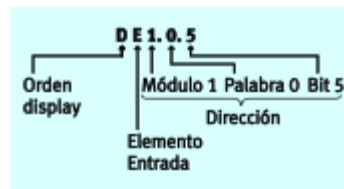
Una palabra está compuesta de *byte* 0 y 1 y contiene direcciones de bit desde 0 hasta 15.

Figura 36. **Configuración de *bytes* de la palabra 0**



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 220.

Figura 37. **Ejemplo de una orden de lectura**



Fuente: Festo. *EasyPort USB*. p. 221.

2.3.3. Nivel de transmisión EasyPort USB

Los datos realmente transmitidos en el momento de la transmisión, corresponden casi completamente a los datos introducidos como símbolos ASCII a nivel de usuario.

Criterios válidos para la transmisión de datos:

- La dirección y el valor de los datos deben introducirse de manera hexadecimal.

- Los valores emitidos por el EasyPort USB siempre se muestran como números hexadecimales.
- Los números con coma flotante se codifican.
- Cada mensaje termina con un CR, equivalente a la tecla *intro*.
- Cada orden para la propia dirección recibe una respuesta, para ello se separa la primera letra de cada orden *Display* o *Modify*, las órdenes *Modify* se expresan mediante el valor de datos real en el módulo, este valor de datos normalmente es el mismo que el de la orden. A la respuesta de una orden de *display* se agrega el valor comprobado, escrito de la misma manera que la orden de modificación *Modify*.

2.4. Fluid Lab PA







Para la instalación de la plataforma Fluid Lab PA en una PC es necesario cumplir con ciertos requerimientos mínimos del equipo, los requerimientos mínimos son los siguientes:

- PC (como mínimo, Pentium 200 MHz, 32 MB RAM, tarjeta gráfica de 600 x 800, unidad CD-ROM 8x).
- PC con interface serie (COM1...COM8).
- Unidad de alimentación de 24 V para la alimentación del EasyPort.
- EasyPort DA (interface).
- Unidad de conexión, analógica.
- Unidad universal, digital.

2.5. Utilización del software

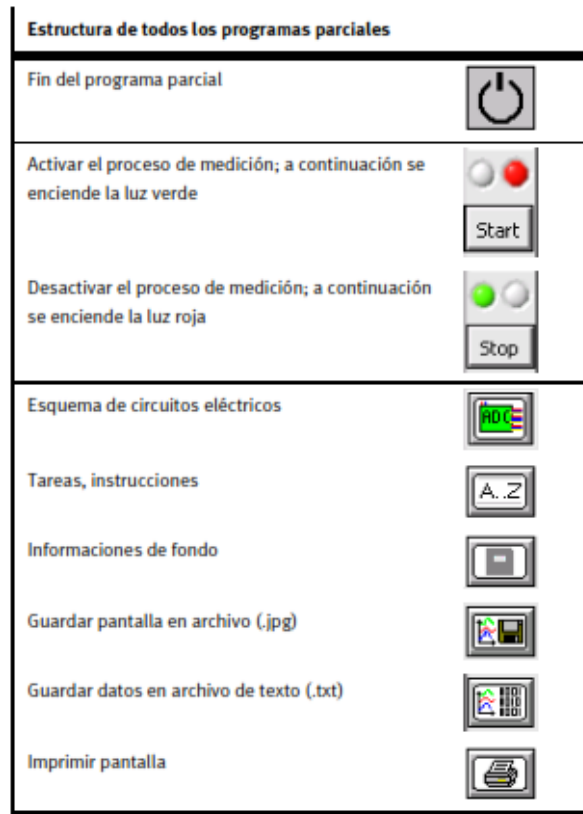
La imagen a continuación muestra las herramientas básicas del menú principal del programa.

Figura 38. **Grupo principal, selección de programa**

Menú principal	
Fin de programa	
Pruebas básicas	
Conexión de cilindros	
Técnica proporcional	
Ajustes previos	
Informaciones sobre modificaciones	

Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA*. p. 64.

Figura 39. **Programas parciales, selección de funciones**



Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA.* p. 6.

A continuación se presenta los posibles ajustes de la superficie del usuario.

- Escalas entre el valor máximo y mínimo, introduciendo otro valor. Para ello, colocar el cursor en el recuadro y sobrescribir el valor.
- A modo de alternativa, cambiar los valores haciendo *clic* sobre las flechas.

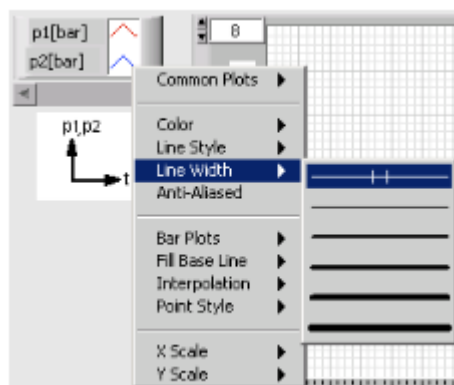
Figura 40. **Ejemplo de escalas de medición y colores para representación de los datos medidos**



Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA.* p. 66.

- También pueden cambiarse los colores, los tipos de líneas y el grosor de las líneas de los diagramas, para ello, colocar el puntero del ratón sobre la representación de las líneas y pulsar el botón izquierdo del ratón, entonces se abre un submenú para efectuar las modificaciones.

Figura 41. **Ejemplo para cambio de tipo de línea, estilo o color de la gráfica**



Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA.* p. 66.

2.5.1. Modificación de los textos

A continuación se describe la forma de modificar los textos. Se puede adaptar, ampliar o reducir los archivos de textos según sus preferencias.

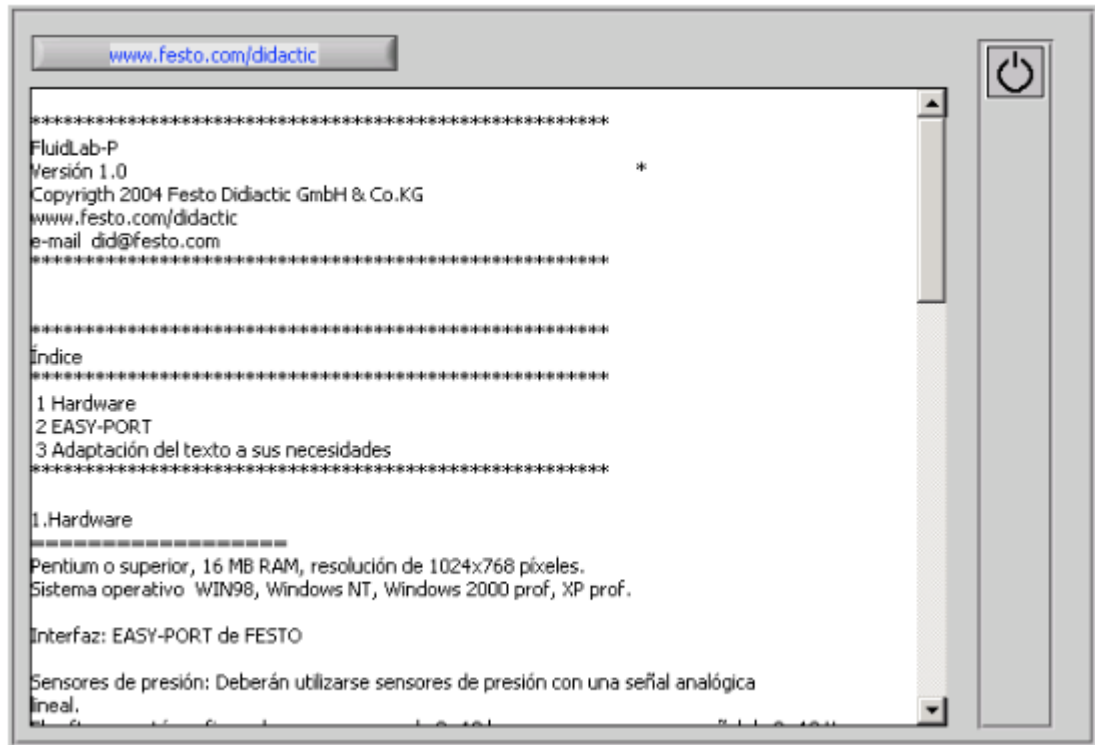
Para ello, utilizar el editor de Windows (editor ASCII), por ejemplo Edit.

Por lo general, el nombre del archivo consta abajo a la izquierda, entre paréntesis rectangulares.

Al abrir el archivo que se desea modificar utilizando el editor ASCII, puede proceder a efectuar las modificaciones correspondientes.

Con el icono "?", se abre un archivo de ayuda que se presenta en la figura 42, en el que se describe de modo detallado la forma de proceder.

Figura 42. Portal de acceso para modificación de los textos



Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA.* p. 67.

Todos los textos constan en alemán, inglés, español y francés. Como máximo se pueden crear cinco idiomas. Los archivos correspondientes se encuentran en subcarpetas de la carpeta Fluid Lab y se diferencian por la extensión del nombre del archivo:

- Textos en alemán ..\german*.GER
- Textos en inglés ..\english*.ENG
- Textos en francés ..\french*.FRA
- Textos en español ..\spanish*.SPA
- Textos en italiano ..\italian*.ITA

Todas las palabras que se utilizan en el software, están memorizadas en un archivo ASCII.

Usted tiene la posibilidad de adaptar esas palabras a sus preferencias. Sin embargo, no se puede cambiar la estructura. Las nuevas palabras tampoco deben ser más largas que las anteriores, ya que de lo contrario es posible que la palabra posteriormente no aparezca en el software.

2.5.2. Ajustes en el software

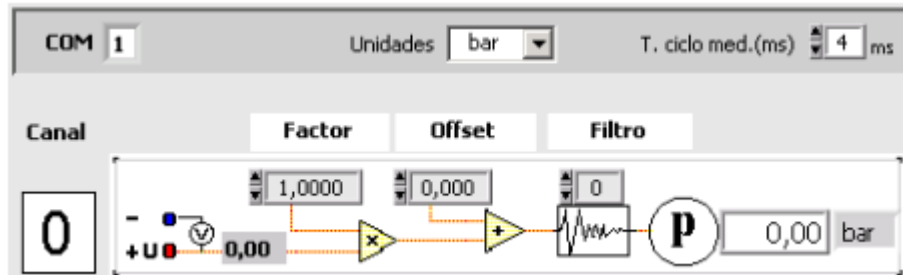
Para acceder a la función de ajustes, hay que hacer clic en el símbolo de la llave. A continuación se puede indicar el número de la interface serie eligiendo una interface desde COM1 hasta COM8. La señal analógica del detector por lo general de 0 a 10 V tiene que convertirse matemáticamente para que aparezca la magnitud física.

$$\text{Magnitud física} = \text{Valor de medición} \bullet \text{Factor} + \text{Offset}.$$

Si la señal de salida de un detector es de 0 a 10 V con 0 a 10 bares, se obtiene el factor 1.

Si habiendo 0 bar en la salida del detector se indica una tensión de, por ejemplo, 0,1 V en la salida del detector, la indicación puede corregirse cambiando el *offset* a -0,1 V.

Figura 43. **Menú de ajuste de factor y *offset***



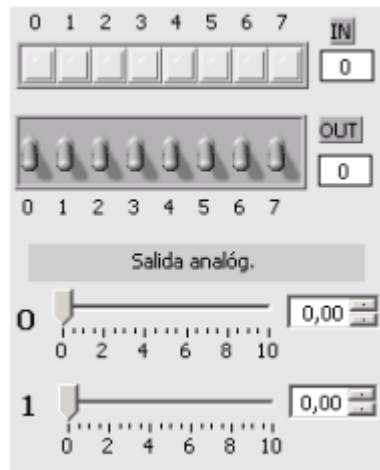
Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA.* p. 69.

En el extremo izquierdo de la imagen puede verse en canal y a continuación, la tensión actual. Si la señal oscila fuertemente, puede agregarse un filtro con valor medio multiplicado por 0 a 4. De esta manera, las señales reaccionan más lentamente. En la ventana de la derecha aparece el valor físico de la medición actual.

Atribución de los canales:

- Canal 0 = detector de presión (presión de entrada)
- Canal 1, 2 = detector de presión (en el cilindro)
- Canal 3 = detector de caudal, detector de fuerza

Figura 44. **Conexión de los detectores**



Fuente: Festo. *Fluid Lab*. PA. p. 70.

Con los interruptores selectores se pueden controlar las salidas digitales. Con los reguladores corredizos tipo cursor, puede ajustarse la tensión de las dos salidas analógicas. Una vez efectuados los ajustes del software, deben memorizarse en el soporte de datos. Para ello, pulse el botón que se encuentra a continuación.

Figura 45. **Botón de guardado de datos para los detectores**

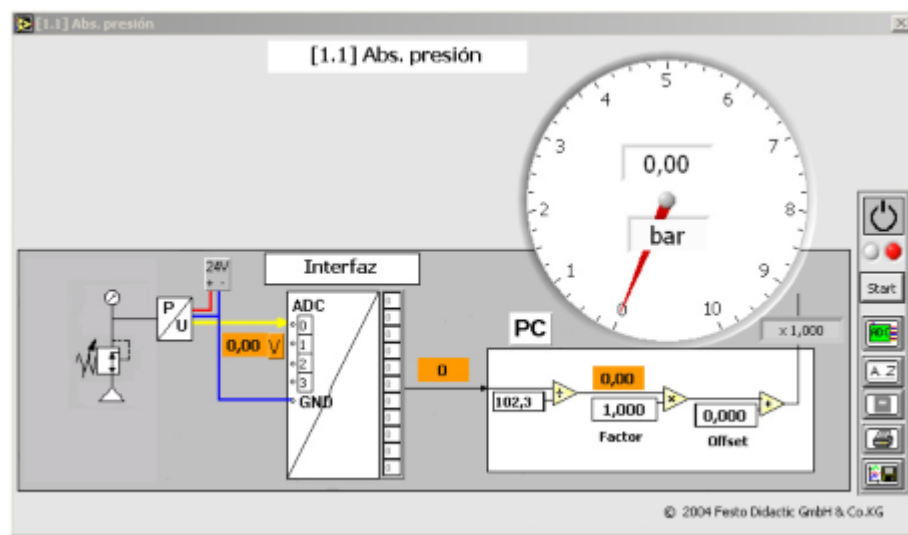


Fuente: Festo. *Fluid Lab*. PA. p. 70.

2.5.3. Medición de la presión

Después de seleccionar las pruebas básicas o, respectivamente, la detección de la presión, se activa el siguiente programa:

Figura 46. Ventana de medición de presión en Fluid Lab



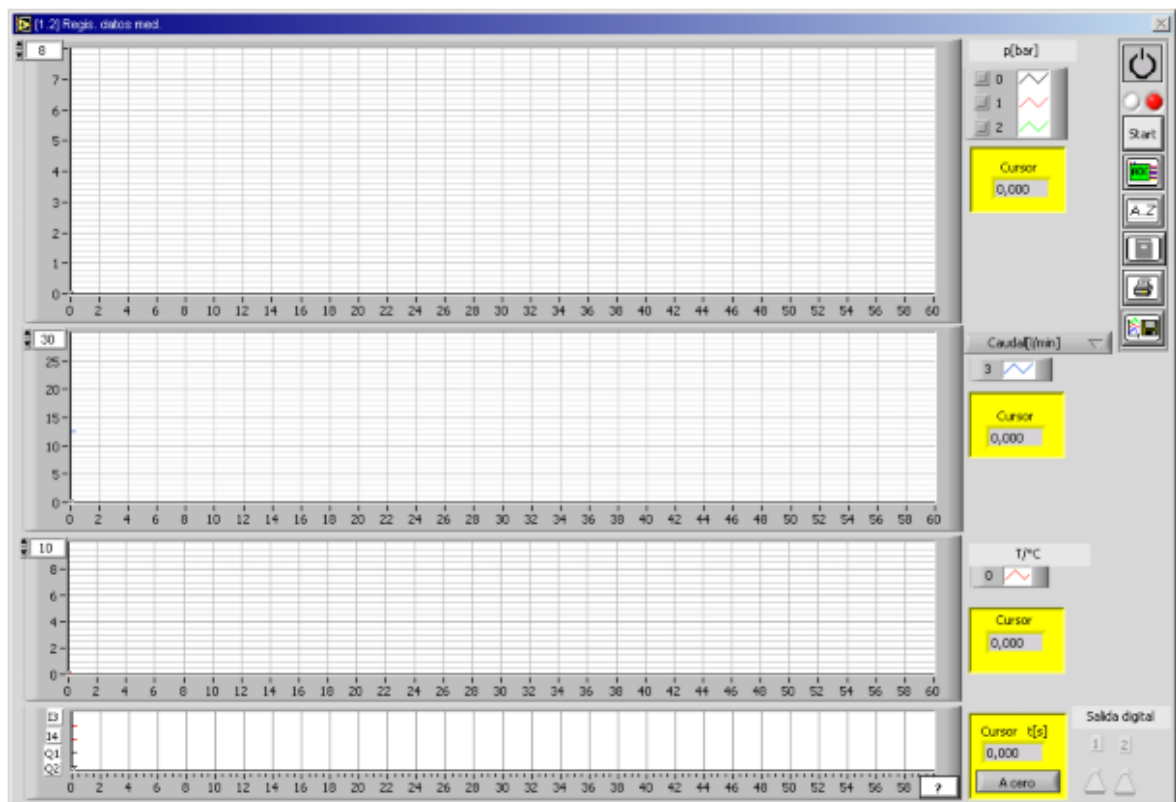
Fuente: Festo. *Fluid Lab*. PA. p. 71.

- Configura el esquema de distribución de la parte neumática.
- Conecte el detector de presión en el canal 0. Después de pulsar el botón de activar, se procede a la lectura de la presión. En la posición de *stop*, es posible modificar la escala de la indicación de la presión.

Si los valores de la presión no son los correctos, deberá adaptarse correspondientemente el factor o el *offset* en el menú de ajuste, el icono de la llave.

Captación de datos de medición: con este subprograma puede controlarse el funcionamiento de una configuración. Este programa permite la representación de presiones y fuerzas, además, de 2 entradas digitales y 2 salidas digitales.

Figura 47. Subprograma para captación de datos de medición Fluid Lab



Fuente: Festo. *Fluid Lab*. PA. p. 72.

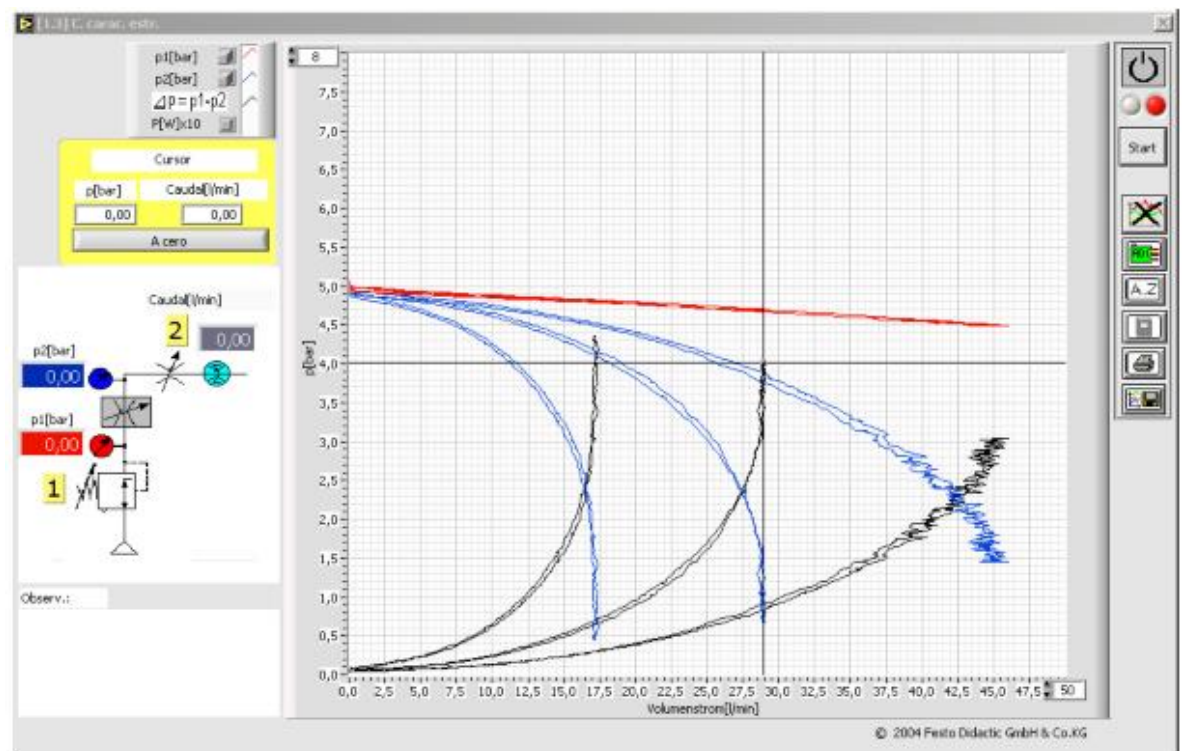
Se inicia la medición pulsando el botón *start*. Para cancelar la medición se debe utilizar el botón *cancel*, el botón con la x. Además, con el ratón puede moverse el puntero por el diagrama para evaluar los resultados de la medición.

A continuación se presenta algunos ejemplos de aplicación:

- Control de los detectores y actuadores analógicos y digitales
- Control de los circuitos neumáticos o electro neumáticos

Para la característica de estrangulación se puede hacer uso del siguiente programa, para analizar el funcionamiento de una válvula reguladora con diversos ajustes. La línea característica se obtiene mediante dos sensores de presión y un caudalímetro.

Figura 48. **Subprograma para línea característica de estrangulación en Fluid Lab**



Fuente: Festo. *Fluid Lab*. PA. p. 73.

Ejercicio práctico

- Montar el sistema de control neumático según el esquema.
- Realizar el cableado de EasyPort según el esquema.
- Controlar el funcionamiento de los sensores y, si es necesario, adaptar el factor y el *offset*.
- Ajustar la presión del sistema.
- Abrir ligeramente la estrangulación de la válvula reguladora objeto del control.
- Cerrar completamente la válvula reguladora 2. Iniciar la medición.
- Abrir lentamente la válvula 2 y cerrarla nuevamente (generación de una carga contraria).

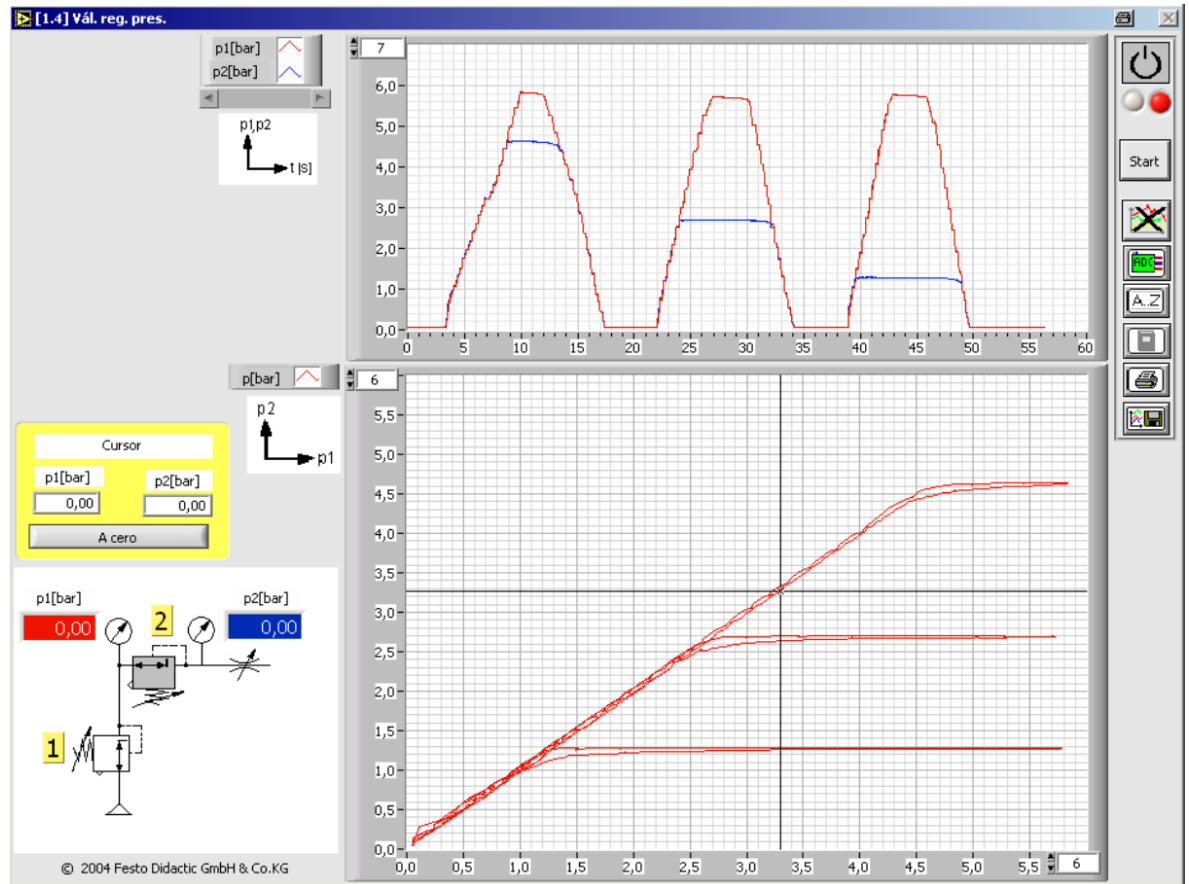
Repetir el ensayo con la estrangulación cerrada a medias y completamente.

2.5.4. Válvula reductora de la presión

Con el subprograma que se muestra a continuación es posible determinar la línea característica de una válvula reductora de la presión.

Con ese fin, se mide la presión delante y detrás de la válvula reductora de la presión. El resultado se muestra en un diagrama.

Figura 49. **Subprograma para ajuste y medición de la válvula reductora de la presión**



Fuente: Festo. *Fluid Lab. PA*. p. 74.

Ejercicio práctico para curva característica de la válvula reductora de presión.

- Efectúe el montaje del sistema neumático de acuerdo con el esquema.
- En la válvula que es objeto de la prueba [2], ajuste una tensión mediana del muelle.
- Ajuste 0 bar en la válvula [1].

- Active el software.
- Aumentar lentamente la presión en la válvula [1]. Observar los valores de medición.
- A continuación, volver a disminuir la presión en la válvula [1].
- Fin de la medición.

Como es bien sabido, en ocasiones suelen surgir problemas al momento de la medición de un sensor o sistema completo de control, lo importante es no entrar en pánico y seguir una serie de pasos adecuados para encontrar el error cometido y corregirlo. A continuación se presenta una serie de pasos para los problemas más comunes en una medición.

No se reciben valores de medición.

- Comprobar si está puesta la tensión eléctrica.
- Comprobar si están conectados todos los cables correctamente.
- En el EasyPort tiene que estar tinteando el led verde.
- Comprobar si se utiliza el puerto COM1 al COM8; luego efectuar el ajuste que corresponda en el software.
- Después de efectuar los cambios, cerrar el programa, memorizar los datos (símbolo de disquete); a continuación, salir del menú y activar nuevamente el software.

Los valores medidos no son correctos.

Si los valores medidos no coinciden con las magnitudes físicas, deberá efectuarse el ajuste correspondiente del factor y del *offset* en el menú de ajustes, el icono de la llave.

- La imagen en la pantalla es demasiado pequeña.
- El software funciona con una resolución de 800 x 600.
- Recurrir al menú de Windows correspondiente y efectuar el ajuste de la resolución de las imágenes en pantalla.
- Se reciben valores de medición, pero en los diagramas no aparecen las líneas.
- Comprobar los valores máximos y mínimos en las escalas. Si procede, ajustar en función los valores de medición actuales.
- Comprobar los colores de las líneas características (puede ser que sean blancas sobre fondo blanco).
- Los valores de medición muestran oscilaciones considerables.
- Comprobar si están conectadas correctamente todas las líneas a masa.
- Modificar el ajuste previo correspondiente al valor de la filtración o atenuación de las señales.

3. SINTONIZACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE NIVEL Y DE FLUJO DE AGUA

Para la aplicación del método de Ziegler y Nichols es necesario realizar pruebas al sistema completo y funcional en concreto, de manera que sus variables PID puedan ser identificadas y estén completamente adecuadas al sistema, ya que de esta manera se obtienen los parámetros tomando en cuenta tiempos de reacción de actuadores y sensores, así como los errores de los mismos, por lo tanto el mapeo de los equipos y el sistema en general es de mucha importancia para poder aplicar el método Ziegler y Nichols.

Para comprender más acerca del mapeo y lo que implica, se puede decir que el mapeo es localizar y representar gráficamente la distribución relativa de las partes de un todo.

En el caso del mapeo de equipos se refiere a la representación gráfica del proceso que se desea realizar, es el efecto que producen los actuadores el cual es captado por los sensores ubicados en el sistema, de esta forma es posible determinar la forma en que el sistema reacciona a ciertos cambios llamados perturbaciones, y así poder determinar las variables PID adecuadas para que el sistema pueda ser controlado de forma óptima.

3.1. Descripción del equipo

El equipo a utilizar es llamado Compact Workstation el cual es una estación didáctica diseñada por Festo para el aprendizaje acerca de controles PID, uso de sensores, transductores y PLC para desarrollar los conocimientos básicos de control necesarios para luego aplicarlos en el campo laboral.

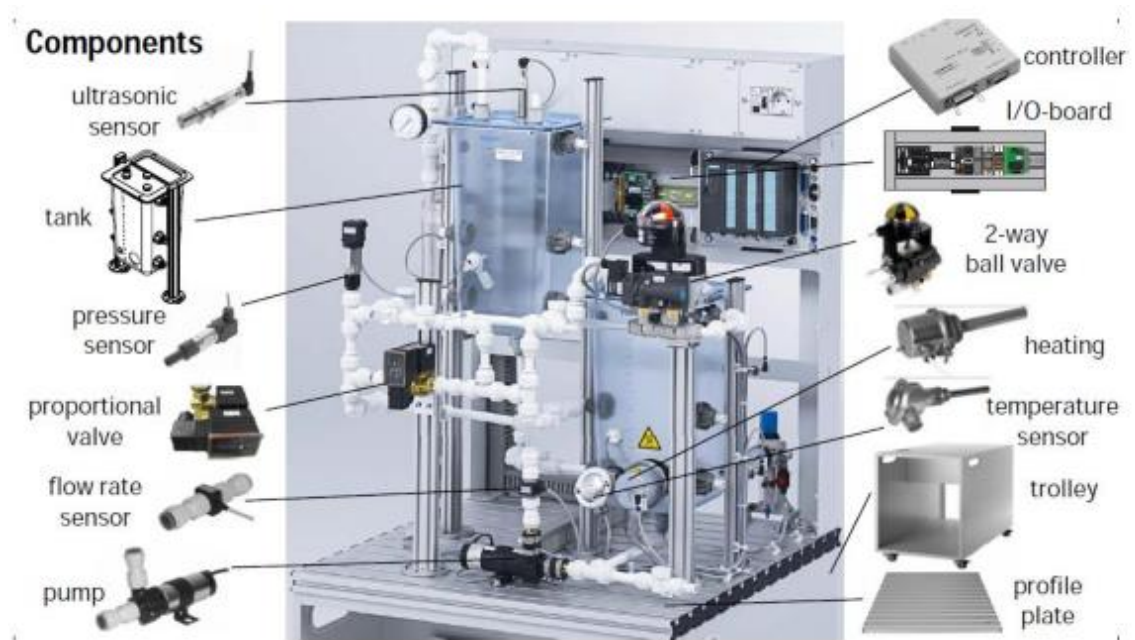
3.1.1. Módulo Compact Workstation

El módulo Compact Workstation es una estación de trabajo que combina cuatro lazos cerrados con sensores y actuadores, tanto analógicos como digitales, también cuenta con un PLC con el cual es posible controlar individualmente o en conjunto diferentes tipos de controles, por ejemplo:

- Sistema de control de nivel
- Sistema de control de caudal
- Sistema de control de presión
- Sistema de temperatura controlada

A continuación se presenta una figura de la estación de trabajo Compact Workstation, mostrando generalidades de sus componentes.

Figura 50. **Componentes MPS compact Workstation**

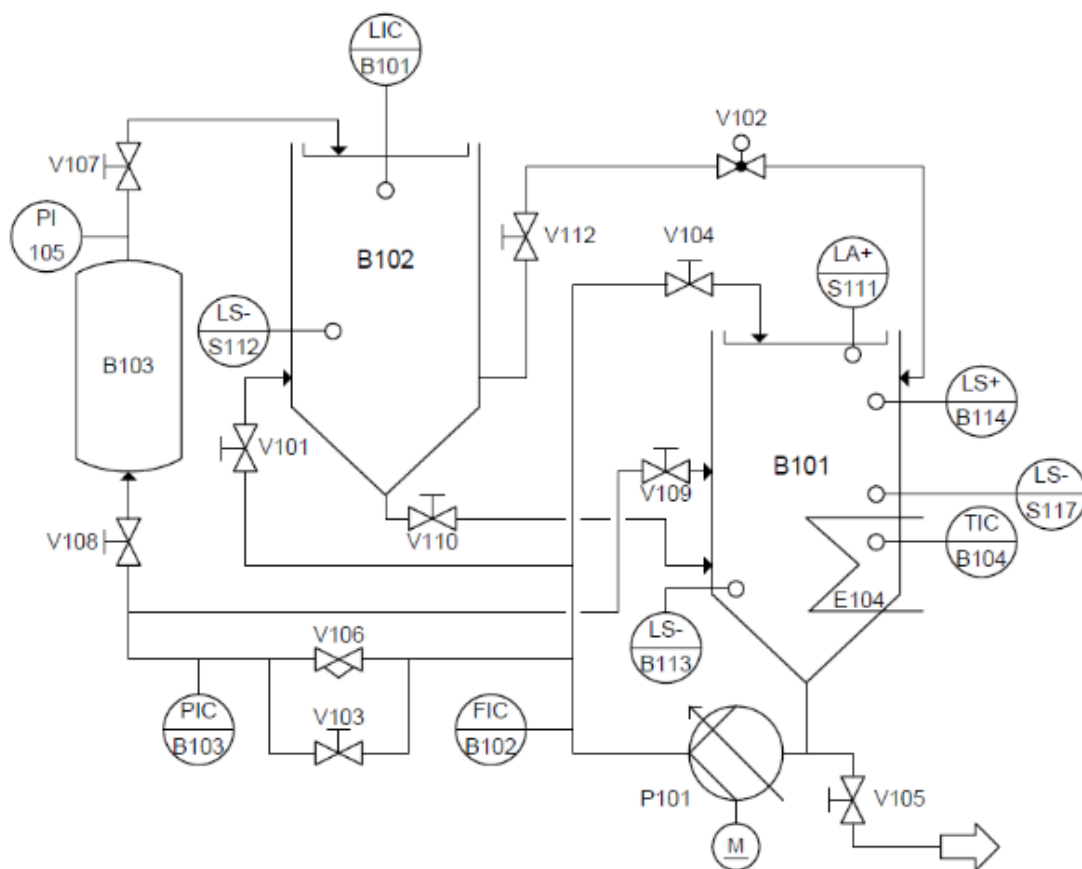


Fuente: ADIRO, Jürgen. *Compact Workstation Manual*. p. 5.

Para conocer el módulo Compact Workstation de manera más completa, se hará uso de un diagrama de instrumentación del mismo, junto con su tabla de símbolos.

A continuación se presenta el diagrama del módulo Compact Workstation en la figura 51, con su simbología la cual se puede encontrar en la tabla X.

Figura 51. Diagrama de instrumentación



Fuente: ADIRO, Jürgen. *Compact Workstation Manual*. p. 9.

Tabla X. **Simbología de instrumentación del módulo**

Símbolo	Significado
V105	Válvula manual
PUMP 101	Bomba centrífuga
LSL B113	Sensor de nivel bajo B113
LSH B114	Sensor de nivel alto B114
TIC B104	Controlador e Indicador de Temperatura B104
E104	Sensor de temperatura
LS S117	Interruptor de Nivel S117
B101	Tanque 1
LA S111	Alarma de Nivel S111
V102	Válvula solenoide de bola
V104	Válvula manual
V109	Válvula manual
V110	Válvula manual
V112	Válvula manual
FIC B102	Controlador e Indicador de Flujo B102
V101	Válvula manual
V103	Válvula manual
V106	Válvula proporcional
V107	Válvula manual
V108	Válvula manual
LS S112	Sensor de Nivel S112
B102	Tanque 2
LIC B101	Controlador e Indicador de Nivel B101
PIC B103	Controlador e Indicador de Presión B103
PI 105	Indicador de Presión
B103	Tanque de Presión

Fuente: ADIRO, Jürgen. *Compact Workstation Manual*. p. 10.

3.1.2. Bomba centrífuga

La bomba utilizada en este sistema de control es una bomba centrífuga de la marca Johnson modelo CM30P7-1, que trabaja con un voltaje de 24 Vdc y proporciona un caudal máximo de 5 l/min y se muestra en la figura 52.

Figura 52. Bomba centrífuga



Fuente: Festo. *Unidad de bomba*. <http://www.festo-didactic.com/int-es/learning-systems/automatizacion-de-procesos/edukit-pa/unidad-de-bomba.htm?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xOC4xMTE4LjU2NzQ>. Consulta: marzo de 2015.

3.1.3. Módulo de control PWM

En la figura 53 se muestra el modulo regulador PWM, marca Kaleja modelo D-73553, es un convertidor para controlar el voltaje aplicado de la bomba centrífuga, de manera que recibe los datos digitales enviados por el Easy Port USB para luego utilizar una salida PWM y controlar la velocidad de la bomba centrífuga.

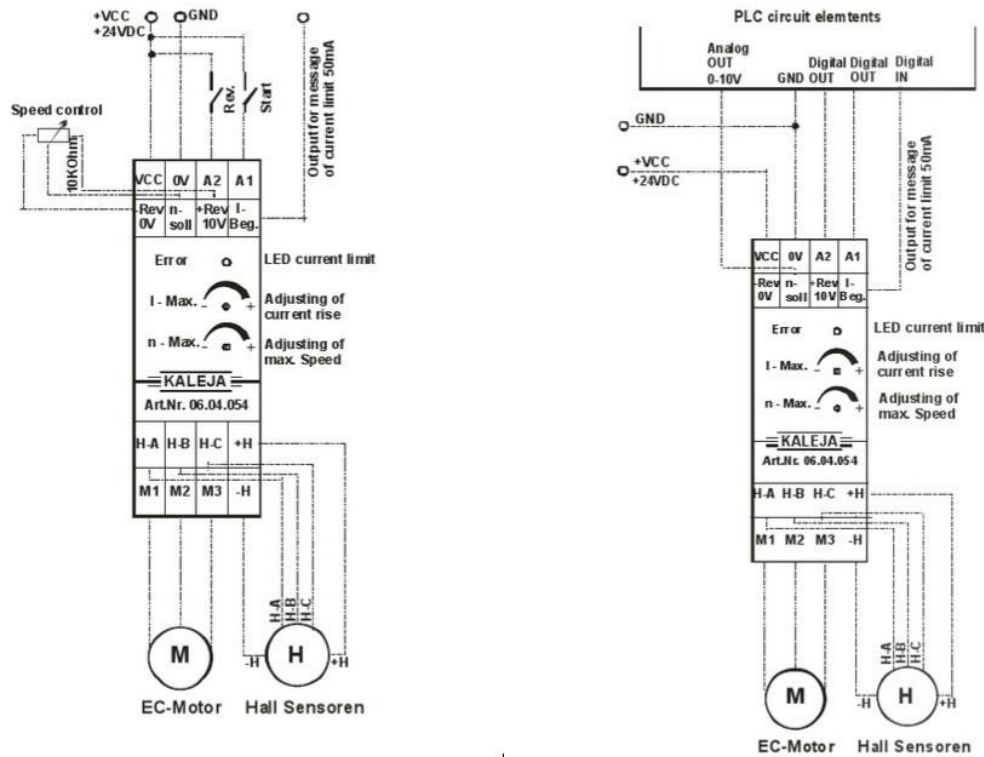
Figura 53. **Módulo PWM**



Fuente: *Módulo PWM*. <https://www.yumpu.com/en/document/view/36523505/motor-speed-control-for-brushles-motor-24vdc-short-all-motion-ab>. Consulta: marzo de 2015.

La figura 54 muestra el diagrama de conexión del módulo PWM, utilizado para el control de la bomba centrífuga.

Figura 54. Conexión módulo PWM



Fuente: *Conexión módulo PWM*. <https://www.yumpu.com/en/document/view/36523505/motor-speed-control-for-brushless-motor-24vdc-short-all-motion-ab>. Consulta: marzo de 2015.

3.1.4. Sensor de caudal

El sensor de caudal utilizado fue citado anteriormente en el capítulo dos, páginas 58, 59 y 60 del presente trabajo de graduación, su margen de medición es de 0,3 – 9,0 l/min y la gama de frecuencias de salida de 40 – 1 200 Hz con lo que es posible definir la siguiente ecuación.

$$1\,200\text{ Hz} = 9,0\text{ l/min} \quad (29)$$

La señal de salida del sensor de caudal está dada en frecuencia, la cual es proporcional al caudal medido, mientras el módulo de adquisición de datos únicamente recibe señales en DC de 0 a 10 V, por lo tanto es necesario un convertidor de frecuencia a voltaje. El convertidor v/f por defecto que trae el sensor de caudal tiene una frecuencia de entrada máxima de 1 000 Hz proporcionando una salida de 10 Vdc. Por lo tanto el caudal máximo que se puede medir es de:

$$1\,000\text{ Hz} \left(\frac{9\text{ l/min}}{1\,200\text{ Hz}} \right) = 7,5 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 10\text{ Vdc} \quad (30)$$

Es necesario saber si el convertidor de señal puede saturarse en el caso que la bomba esté al máximo, se sabe que la bomba centrífuga tiene un caudal máximo de 5 l/min, realizando los cálculos siguientes:

$$5\text{ l/min} \left(\frac{10\text{ Vcd}}{7,5\text{ l/min}} \right) = 6,66\text{ V} \quad (31)$$

El voltaje emitido por el convertidor, cuando la bomba está al máximo es de 6,66 V por lo tanto, no hay riesgo de saturación del convertidor en ningún momento del proceso.

3.1.5. Sensor ultrasónico

La información del sensor ultrasónico fue presentada en el capítulo 2 de este trabajo de graduación, resumiendo, tiene un margen de medición de 0 a 294 mm, una salida analógica de 4 a 20 mA, cuenta con una tarjeta de conversión de

0 a 10 Vdc lineal, esto quiere decir que la conversión mantiene la linealidad del sensor siendo, 0mm igual a 0 Vdc y 294 mm igual a 10 V.

Como todo sensor, este tiene una baja precisión al medir un valor cercano a 0 mm, también en el límite superior empieza a perder su precisión a los 294 mm, cualquier altura de agua en el tanque mayor a 294 mm será medida con una incerteza elevada.

3.2. Detalle de calibración del software

El software Fluid Lab PA cuenta con una configuración para los datos entrantes, ya que el módulo EasyPort USB detecta voltajes analógicos de 0 a 10 V, en la configuración se puede determinar para sensores lineales los valores específicos de cada sensor según el voltaje medido por el módulo.

Como ejemplo puede decirse que si un sensor mide distancias de 0 a 100 mm con un rango de voltaje de 0 a 10 V, quiere decir que cada voltio equivale a 10 mm de distancia, por lo tanto al multiplicar los 10 mm por voltio detectado, se obtiene como resultado el valor en milímetros de la distancia medida, siendo el caso de que el sensor envíe una señal de 4 V, el software hace el cálculo de 10 mm multiplicado por 4 V lo que da como resultado 4 mm.

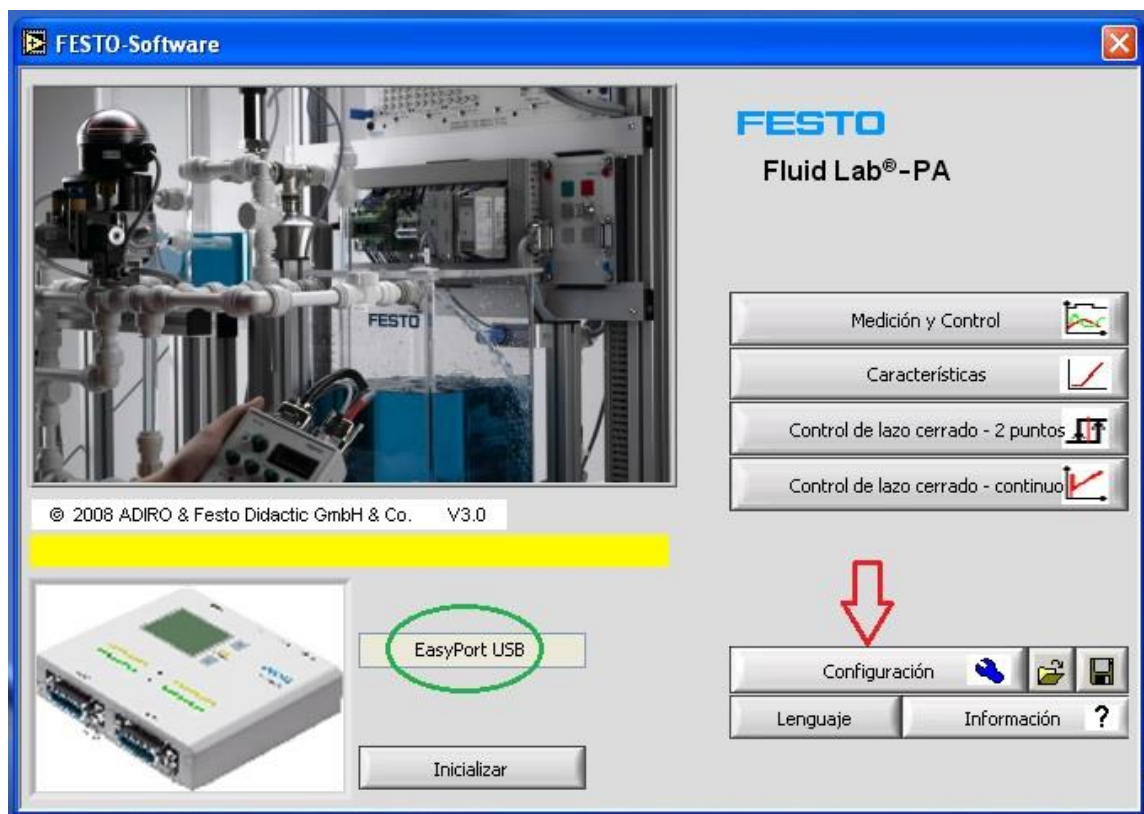
Esta configuración es indispensable en caso de que se haga un cambio de sensor o de algún contenedor del sistema, de manera que pueda ser corregido y analizado de manera más adecuada.

A continuación se presenta una imagen del programa Fluid Lab PA, en la pantalla de inicio, como primer paso es necesario conectar el EasyPort USB con la PC a través de su cable USB, como siguiente paso se presiona el botón

“inicializar” para que el software detecte el módulo que se encuentra conectado a la PC.

Luego de realizado este paso debe aparecer dentro del circulo verde indicado en la figura 53, “EasyPort USB”, esto indica que el módulo ha sido identificado, luego se selecciona la opción “configuración” que está indicada con una flecha roja.

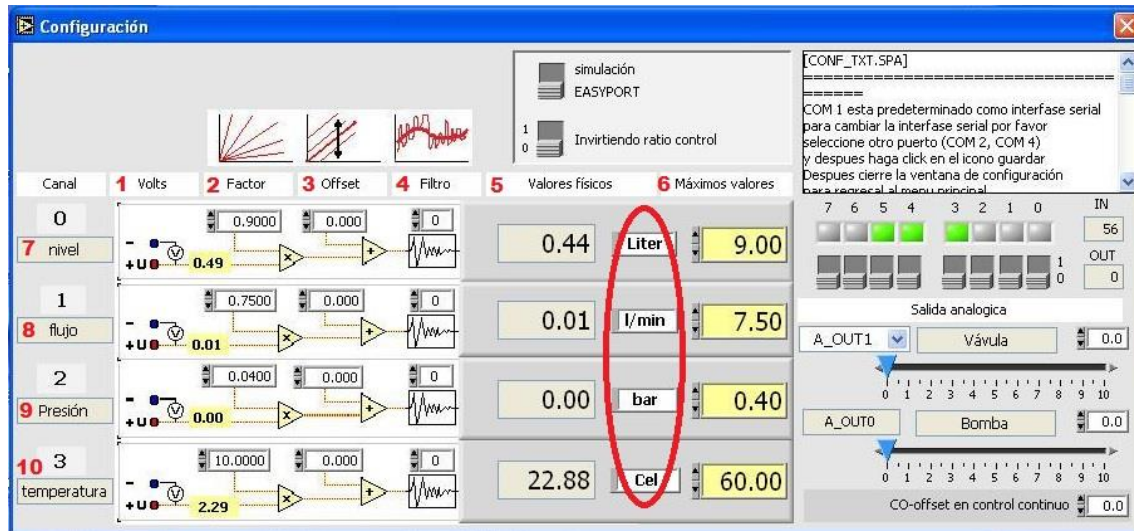
Figura 55. **Pantalla inicial Fluid Lab PA**



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

Luego de elegir la opción configuración se mostrará una nueva ventana que se presenta a continuación en la figura 56.

Figura 56. Configuración Fluid Lab PA



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 56 se muestra la ventana de configuración del software, como se indicó previamente, es necesario configurar el software para poder conocer las magnitudes físicas medidas por los sensores, para realizar una explicación más adecuada, se hará paso a paso, siguiendo los números colocados en la imagen, dichos pasos se presenta a continuación:

- Se presenta el voltaje recibido por el módulo de adquisición de datos, para este caso específico es el EasyPort USB, unicamente es el voltaje enviado por los sensores al módulo.
- El factor es el valor que se va a determinar para trasladar el voltaje medido a la magnitud física medida, como se explicó previamente, este valor será multiplicado por el voltaje medido para obtener como resultado la magnitud física, el procedimiento es sencillo, se obtiene la ecuación lineal del sensor

en cuestión y se toma la pendiente del mismo, este será el valor a colocar como factor.

- El valor *offset* es necesario en caso de tener valores desplazados, en otras palabras, valores que no inician en cero por ejemplo un sensor que mide de 20 a 100 mm y da una señal de 0 a 10 V, se sabe que el valor inicial de cero voltios tiene como magnitud física 20 mm, por lo tanto es necesario colocar el valor *offset* para que no detecte los 0 V como 0 mm.
- Filtrado, este valor regularmente se toma en cero, el filtrado sirve en el caso de tener un exceso de ruido en los valores medidos o una sensibilidad muy elevada para el caso específico de medición, este atenúa el ruido provocado por elementos ajenos al proceso, esto para obtener valores confiables y al mismo tiempo, para implementar las acciones PID sin añadir un aumento al error detectado y por lo tanto evitar el mal funcionamiento del control.
- Los valores físicos como lo indica su nombre, son los valores que son obtenidos como resultado de aplicar al voltaje medido las tres variables anteriores, factor, *offset* y filtrado, luego de implementadas dichas correcciones se obtienen las magnitudes físicas del proceso de manera que no mas fáciles de identificar, medir y procesar para el desarrollo del control del sistema.
- La casilla de máximos valores es modificable, según los valores máximos medidos por los sensores y limitados por su voltaje máximo, en la casilla debe colocarse el valor maximo medido por el sensor para poder realizar el mapeo dentro de los límites de los sensores.

- Es indicado como el bloque de nivel, este bloque horizontal es el que se debe modificar para obtener el valor físico de nivel medido, según los límites de medición del sensor utilizado.
- Indicado como el bloque de flujo, todo valor colocado en las variables de factor, *offset* y filtro, serán aplicados al flujo medido y obtenido en voltios para dejarlo indicado en su magnitud física respectiva.
- Este bloque es indicado para la presión con su dimensión según las variables aplicadas al mismo.
- Finalmente se tiene el bloque de temperatura, al cual, igual que a los anteriores, se le aplican las variables necesarias para obtener su valor físico con una dimensional según las variables seleccionadas.

Finalmente se tiene dentro de un círculo rojo las dimensiones de las magnitudes físicas, estas pueden ser modificadas porque dependen de cómo se haya determinado que van a ser vistas las magnitudes físicas, por ejemplo en el caso del nivel de agua, si son conocidas las dimensiones del tanque, el cual se va a medir, es posible determinar si se quiere expresar su dimensión en volumen como por ejemplo, litros o galones, en caso contrario es posible expresarlo como altura de agua en milímetros o centímetros, según se desee.

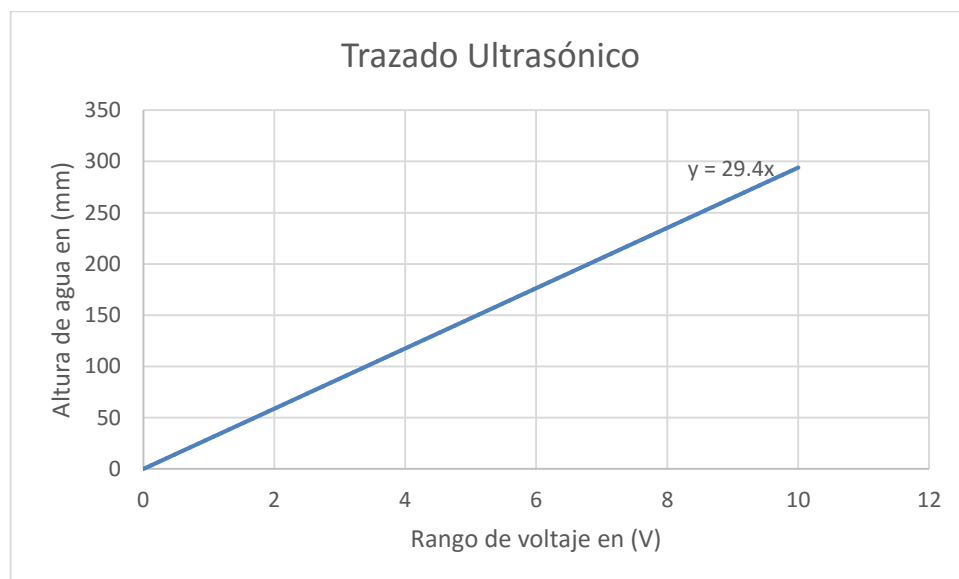
Luego de configurar el software para la magnitud física deseada, se da lugar a las mediciones, con lo que es necesario volver a la pantalla inicial de Fluid Lab PA y seleccionar la opción Medición y Control.

3.3. Mediciones de nivel de agua

Para la medición del nivel de agua se necesita calcular la pendiente del sensor ultrasónico y luego colocar el dato del factor o pendiente en la configuración de software, luego de ello se deben realizar las pruebas respectivas, esto es, encender la bomba centrífuga a valores de entre el 50 al 90 % y verificar en tiempo real que el valor obtenido por el software es igual al valor físico en el tanque de agua.

Para trazar la pendiente del sensor ultrasónico es necesario realizar un pequeño cálculo en un plano cartesiano, colocando en el eje horizontal el rango de voltaje y en el eje vertical se coloca el rango de medición.

Figura 57. **Pendiente del sensor ultrasónico**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se expone en la figura 57, es posible trazar una pendiente utilizando el rango de medición y el rango de voltaje del sensor o también con una simple ecuación, colocando como numerador la diferencia entre el valor máximo y mínimo de medición y en el denominador colocando la diferencia entre el valor máximo de voltaje y el valor mínimo como se muestra a continuación.

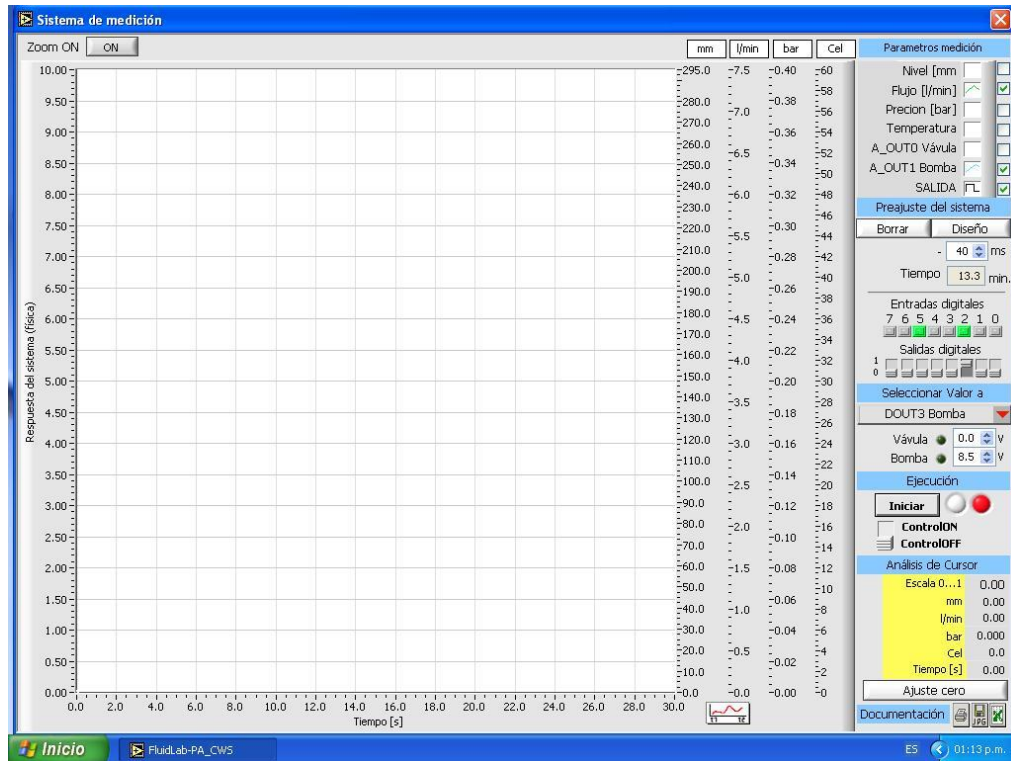
$$\text{Factor o pendiente} = \frac{294 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{10 \text{ V} - 0 \text{ V}} = 29,4 \quad (32)$$

Como se ve en la figura 57, el trazado del sensor ultrasónico no cuenta con un desplazamiento de eje, en otras palabras según la ecuación de la recta $y = mx + b$, el valor de b es igual a cero, esto se da porque el sensor mide inicialmente en 0 mm con un voltaje de 0 V, por lo tanto el valor de *offset* a colocar en la configuración del software es igual a cero.

En cuanto al filtro se puede decir que depende de las pruebas de medición obtenidas, en otras palabras, si al medir se encuentra mucha perturbación se debe aplicar un filtrado con un nivel que depende de la distorsión, el filtro para el caso de medición de nivel de agua no es necesario, dado que el agua bombeada hacia el tanque es propulsada desde abajo del tanque, esto para evitar que el agua tenga demasiada agitación ya que el sensor ultrasónico es muy sensible a las agitaciones que se puedan dar en cualquier superficie medida, sea un líquido o sólido.

Una vez el software está configurado se procede a la medición y control, a continuación se muestra la ventana de medición y control y se procederá a explicar cada paso para realizar la prueba de medición de nivel.

Figura 58. Ventana de medición



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

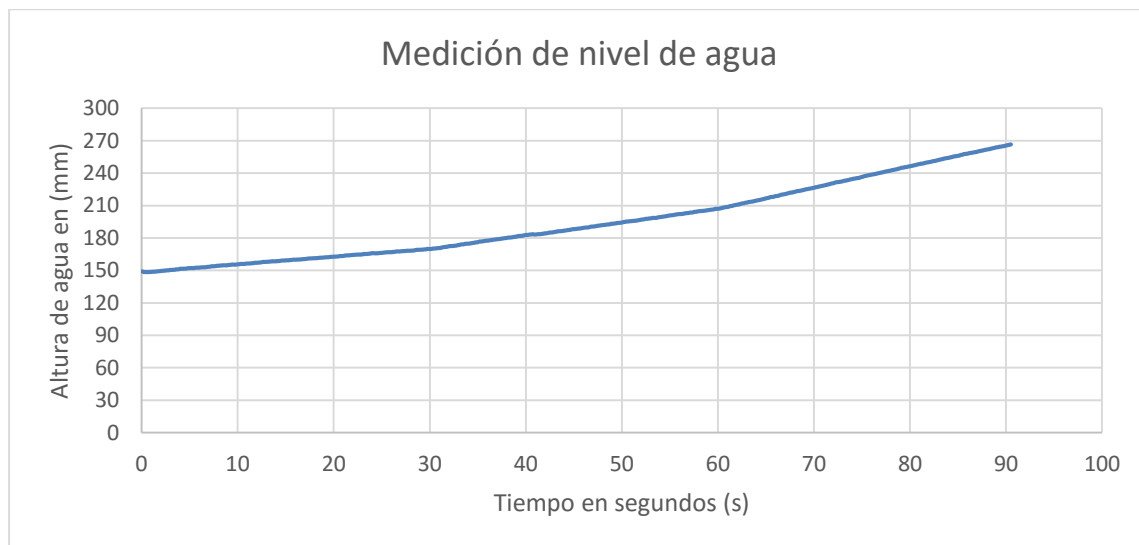
Según la figura 56 se despliegan en el eje vertical izquierdo, valores de voltaje que van de 0 a 10 V, esta es la señal de control enviada por el módulo hacia cada uno de los actuadores ya sea la bomba centrífuga, el calentador, la válvula proporcional o la válvula de bola de 2 vías, estos pueden ser regulados en un rango de voltaje de 0 a 10 V pero también utilizando un control *on/off*, únicamente la válvula de bola de 2 vías y el calentador no pueden ser regulados, los otros dos actuadores tienen placas PWM de control para ser regulados.

En el modo de medición solo puede ser utilizado un actuador a la vez, por lo cual debe ser seleccionado en el bloque llamado seleccionar valor a, que está

ubicado al centro del lado derecho de la imagen, en este bloque se escoge el actuador a controlar, además del voltaje al que se desea que opere dicho actuador.

En el caso del control regulado para la bomba centrífuga debe activarse el bit 2 que está ubicado en el bloque llamado pre ajuste del sistema, este bit activo manda la señal de encendido al módulo PWM de la bomba, al mismo tiempo desactiva la opción del control *on/off*. Por último, es importante configurar el bloque de la esquina superior derecha, llamado parámetros de medición, en este bloque es posible seleccionar los parámetros que se desean graficar, para el caso de control de nivel se seleccionan el nivel en milímetros y la salida de la bomba centrífuga.

Figura 59. **Prueba de medición de nivel**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 59 muestra los resultados de una medición de nivel, tiene cierta concavidad hacia arriba, eso es porque la velocidad de la bomba se fue incrementando paso a paso, a manera de conocer los efectos que estos cambios produce, ya que a un valor constante de velocidad, la altura de agua debería ser constante también, estos aumentos de velocidad se hacen con el fin de verificar que realmente la bomba centrífuga aumenta el flujo de agua hacia el tanque y no exista algún tipo de problema con la misma.

Anteriormente se menciona que la bomba centrífuga debe manejarse en un rango de 50 hasta el 90 % o de ser necesario hasta el 100 %, esto se menciona porque físicamente al arrancar la bomba con un valor inferior al 50 % la cantidad de agua bombeada es muy pequeña.

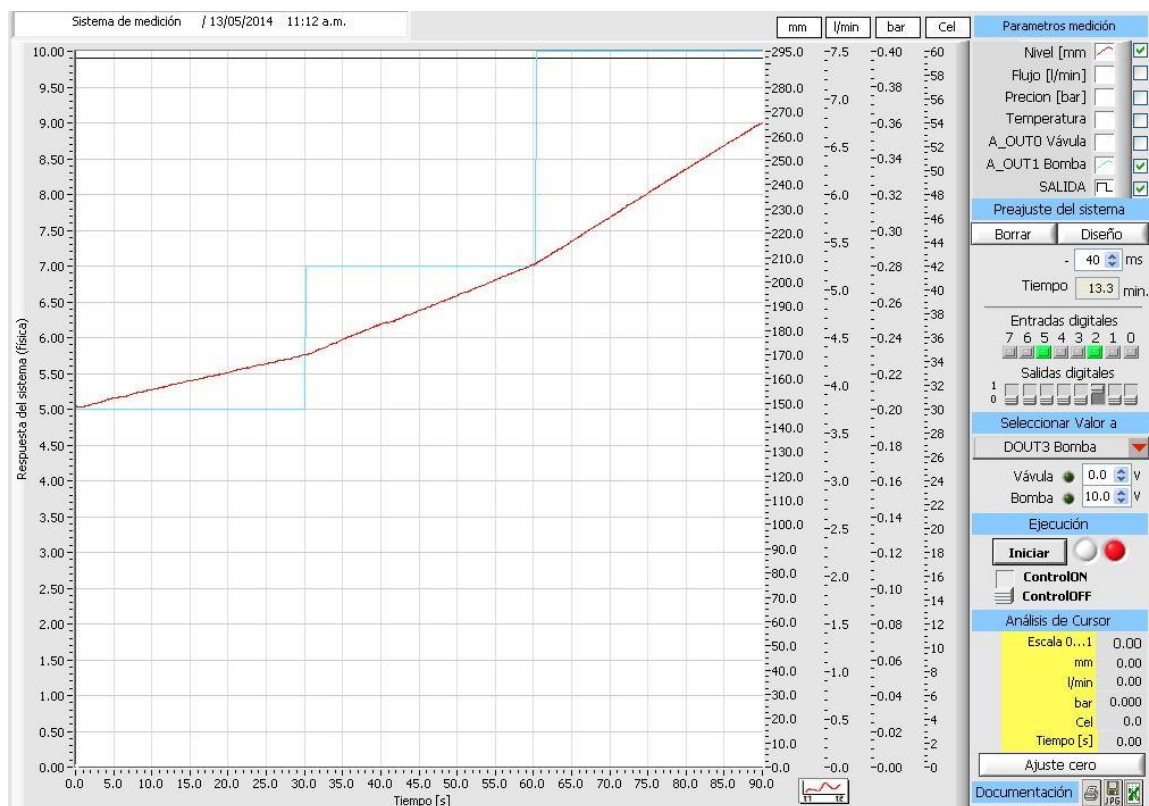
Dicho de otra forma, no es significativa pero la razón principal de no trabajar en esos valores tan bajos de velocidad es porque, la bomba utilizada está sellada y no tiene ventilación por disipación, por el contrario utiliza la misma agua bombeada para enfriar sus mecanismos internos, trabajando a una baja velocidad la bomba incrementa su temperatura y el enfriamiento por agua se vuelve insuficiente, con lo que es posible causar un gran deterioro a la bomba o incluso daños que pueden ser irreversibles.

De esta manera se justifica el no utilizar la bomba a niveles de velocidad menores al 50 % o en cualquier caso, no someterla a estas bajas velocidades por demasiado tiempo.

El software Fluid Lab PA, entrega estos datos de nivel de agua en el tiempo en un documento de texto, ordenado por columnas con los valores de cada uno de los sensores y actuadores, luego de obtener este archivo de texto es necesario graficarlo a través de cualquier programa con la capacidad de graficar, una vez

obtenidas las gráficas se da inicio a la interpretación y análisis del proceso, a continuación en la figura 60 la gráfica obtenida por el software, reiterando, para poder analizar más detenidamente es necesario graficar los datos obtenidos a través del archivo de texto generado por el programa.

Figura 60. Gráficas del software



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

Como se expone en la figura 60, la gráfica en color rojo es el nivel de agua, en el primer eje vertical del lado derecho se pueden ver los valores del nivel en milímetros, la gráfica en color celeste es la salida del módulo hacia la tarjeta de control de velocidad de la bomba.

Analizando el gráfico es posible ver que el nivel de agua incrementa de forma lineal con respecto a la velocidad de la bomba, los valores de voltaje de control están en el eje vertical derecho, este se inicia con un valor de 5,0 V, luego a los 30 segundos del proceso se incrementa el voltaje a 7,0 V, con lo que se da un aumento significativo en el ritmo de crecimiento del nivel de agua, a los 60 segundos del proceso se incrementa el voltaje de control a 10,0 V.

Con esto es posible notar que el ritmo de llenado incrementa significativamente y permanece casi lineal, las pequeñas variaciones puede deberse a pequeñas burbujas generadas por la bomba centrífuga o algún tipo de sedimento presente en el agua, en este caso el sedimento es imperceptible por lo cual las pequeñas variaciones pueden ser por burbujas generadas al momento de la succión de agua de un tanque, que luego son enviadas al tanque donde se realiza la medición.

Finalmente se obtiene una prueba de medición de nivel de agua, con esto realizado y verificando que todo esté en orden se puede proceder de manera segura con las mediciones para el análisis completo, y la aplicación del método Ziegler y Nichols.

Para iniciar la aplicación del método Ziegler y Nichols se aclara previamente que las siglas PV significan variable de proceso y las siglas CV significan variable de control, ambas son diferentes dado que la variable de control es la que se manipula en el software, la que puede ser modificada según sea la necesidad.

La variable de proceso es la variable física medida, en otras palabras, al cambiar la variable de control, la variable de proceso dado que es física se sujeta a incertezas, inercias, características de los materiales de los actuadores así

como características de las sustancias que se manejan, en este caso específico, la viscosidad del líquido y características del mismo.

Para iniciar, una vez configurado el software con su factor, *offset* y filtro, se accede a la ventana de medición y control, con esto se da inicio a una medición siguiendo los pasos del método Ziegler y Nichols.

Como paso inicial dentro de la ventana de medición y control, se aumenta la variable de control de la bomba al 50 % esto significa aumentar el voltaje a 5,0 V y luego observar cómo se comporta la variable de proceso, dándole un intervalo de tiempo suficiente para estabilizarse, esto es un tiempo mayor a 2 segundos ya que es lo que tarda la bomba desde el arranque hasta el momento en que bombea de forma constante, pero esos 2 segundos no son suficientes para poder estudiar el gráfico y obtener los parámetros PID, de manera que se decidió después de algunas pruebas que el intervalo de tiempo fuese de 10 segundos.

Esto no es algo específico del método Ziegler y Nichols ya que únicamente hace referencia a observar la variable del proceso, se decidió que los intervalos fuesen de 10 segundos porque el tiempo es suficiente para estudiar la variable y obtener los parámetros, pero además, porque no se puede prolongar demasiado el tiempo ya que el tanque se está llenando, si los intervalos de tiempo se incrementan demasiado entonces el tanque puede llenarse antes de completar las pruebas. Una vez comprendido esto se puede proceder a realizar las pruebas.

Se inicia el proceso con el 50 % de la velocidad de la bomba esto es 5,0 V esto es la variable de control CV, luego de 10 segundos aproximadamente, se incrementa un 5 % la CV lo que genera un total del 55 %, luego de otros 10 segundos se incrementa nuevamente la CV pero en un 10 %, esto es al 65 % y

nuevamente se permite un intervalo de 10 segundos para que se establezca la variable del proceso PV.

Estos cambios de la variable de control se hacen manualmente al momento que el tiempo lo indique, por lo cual podría incurrirse en errores de tiempo ya que una persona en condiciones psicofísicas óptimas tiene un tiempo de reacción de entre $\frac{3}{4}$ a 1 segundo, esto introduce error a los 10 segundos determinados inicialmente pero el método se basa en la observación y análisis, por lo cual no perjudica el hecho de reaccionar 1 segundo antes o después, al final se estudiará el proceso tal cual se realizó.

Para asegurar que se reduce cualquier error de la mejor manera posible se deben realizar varias mediciones y luego se debe tomar el promedio de las mismas, lo que se busca es obtener que los parámetros PID sean correctos.

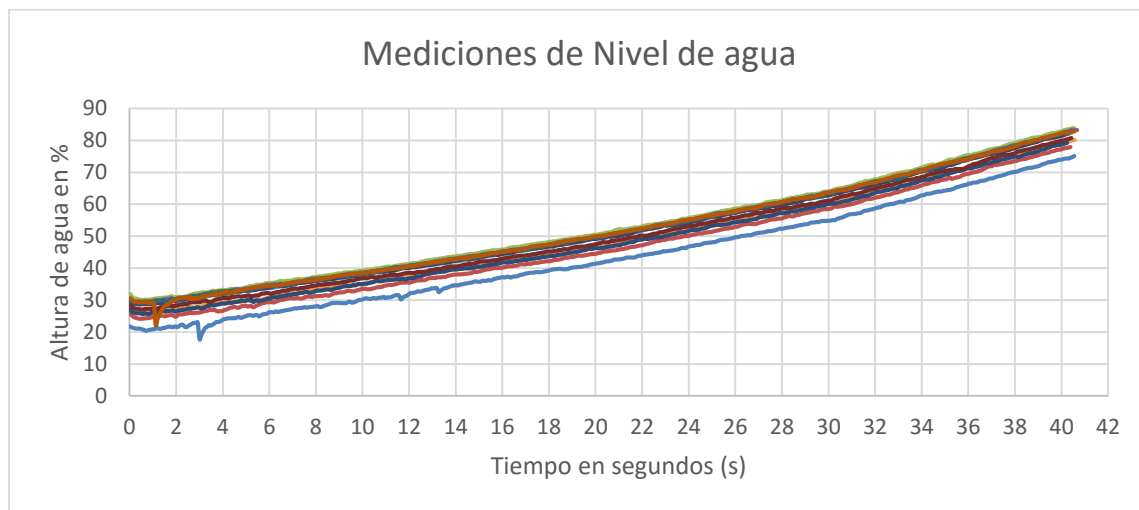
Aunque puede decirse que no es necesario hacer varias mediciones, esto es únicamente en caso de que se produzcan en algunas de las mediciones, o perturbaciones externas, ya que los parámetros PID en este caso específico dependen de la inercia de la bomba, la viscosidad del agua, la masa de agua desplazada y la fricción en tuberías.

La plataforma Compact Workstation cuenta con todos sus elementos, ninguno es cambiado a lo largo de toda la medición, es decir, la bomba de agua utilizada en todas las mediciones es la misma, la masa de agua desplazada, la longitud de las tuberías, entre otras.

Por lo tanto no debe existir variación alguna durante la medición, esto quiere decir que con una medición es suficiente para aplicar el método de Ziegler y Nichols, sin embargo, se realizarán 12 pruebas de medición de nivel, buscando

las mismas condiciones iniciales y los mismos tiempos para los aumentos de la CV, se obtendrá el promedio de las mediciones realizando una sola gráfica y luego serán realizados los cálculos para encontrar las variables PID.

Figura 61. **Dispersión general de nivel**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Según los datos mostrados en la figura 61, se puede notar que el comportamiento del equipo se mantiene igual, el desplazamiento vertical de las gráficas se da porque el punto inicial no es el mismo, es decir que el nivel inicial de agua no es el mismo para todos los casos, esto es porque la bomba centrífuga, como se describió anteriormente, introduce el agua por debajo del tanque para evitar perturbaciones en el tanque, entonces la poca agua restante en el tanque superior baja por efecto de gravedad a través de la bomba.

Por esto, el nivel de agua inicial varía en cada caso, pero la característica de pendiente de las curvas se mantiene igual en todos los casos, también es posible observar en dos de los casos, la gráfica en color café y la gráfica en color

celeste, que al inicio hay un pequeño cambio en el nivel, esto no es porque el nivel haya bajado y nuevamente se haya recuperado, sino por una perturbación creada por burbujas que fueron succionadas del tanque cisterna.

En general se podría tomar cualquiera de estas mediciones para aplicar el método, ya que todas tienen la misma característica y la diferencia sería su desplazamiento vertical, para las ecuaciones del método Ziegler y Nichols el desplazamiento vertical no es significativo, de manera que no se ve aplicado en ningún momento ya que esto depende de las condiciones iniciales.

Una vez realizadas las mediciones anteriores, se calcula el promedio de las 12 gráficas de nivel, obteniendo una sola gráfica promedio la cual se analizará por partes, esto dado que se incrementa el valor de CV cada 10 segundos, por ende debe estudiarse por cada bloque, se utilizará el bloque inicial con la bomba al 50 % de la velocidad para obtener el tiempo de retardo, es el tiempo que tarda la bomba desde el momento que la señal de arranque es enviada, hasta el momento en que el agua es bombeada con regularidad.

Luego de obtener el tiempo de retardo se analizará la perturbación producida por un aumento del 5 %, esto significa tener la CV al 55 % y finalmente se analizará la perturbación al 65 %; de esta forma se obtendrán los parámetros PID para una perturbación del 55 % y una al 65 %, una vez obtenido el parámetro de ganancia en ambos casos se procederá a realizar el promedio de ambos.

Los parámetros PID se encargan de diferentes acciones, la constante proporcional da una salida proporcional al error, tomando el error como la referencia de que tan lejos se está del valor buscado, si se obtiene una constante proporcional alta entonces la respuesta del sistema ante perturbaciones será

bastante elevada, lo que provocaría oscilaciones muy pronunciadas al detectar las más mínima perturbación.

Por el contrario, si la constante proporcional es muy reducida la reacción ante las perturbaciones será muy pequeña, o incluso puede no reaccionar ante ciertas perturbaciones y permitir que el error crezca demasiado, hasta el momento de realizar las acciones necesarias para corregirlo, en ciertos casos puede que se tenga una banda muerta, quedando la variable de proceso ligeramente superior o inferior al valor de la variable de control.

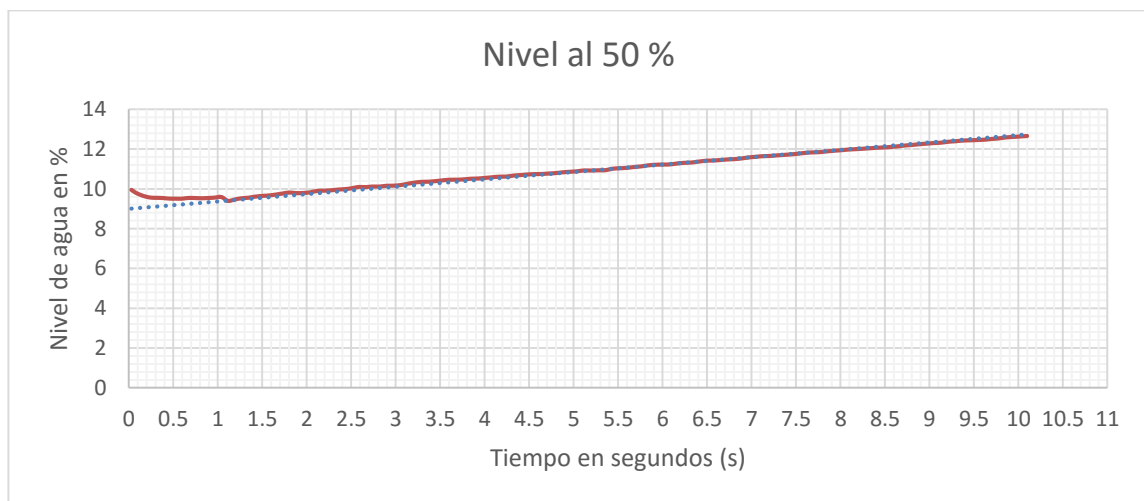
En el caso de la variable integral, es la integral del error, pero esta no corrige el error de manera directa o abrupta como la constante proporcional, es un modo de control lento y aumenta la corrección del error según el error acumulado, esto quiere decir que si hay un aumento considerable del error, la variable integral se encarga de hacer una corrección creciente en un tiempo transitorio.

La constante integral únicamente funciona con perturbaciones transitorias o repentinas, también si el error es negativo no permite que la constante proporcional decaiga, por el contrario, reduce la acción repentina de la constante proporcional para alcanzar a la variable de control sin pasarse del rango de error, en otras palabras esta variable aporta estabilidad y puede reducir oscilaciones en el sistema.

La variable derivativa aplica al proceso la derivada del error, realiza una función previsor lo que hace rápida la respuesta al error, en otras palabras se encarga de proyectar el aumento del error y desarrolla las acciones necesarias para no permitir que el error crezca demasiado, con lo que se reduce el rango de oscilación para alcanzar a la variable de control.

Esta variable tiene una desventaja, la cual es amplificar las señales de ruido del sistema ya que detecta el ruido como señal de error y al desarrollar las acciones correctivas puede aumentar el error en el proceso, además, esta variable es útil únicamente durante procesos transitorios, la acción derivativa permite obtener un controlador de alta sensibilidad, esta permite en valor de corrección que supera a la variable K en caso de ser necesario, lo cual provoca una mejora en la precisión del estado estable.

Figura 62. Nivel de agua con CV al 50 %



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

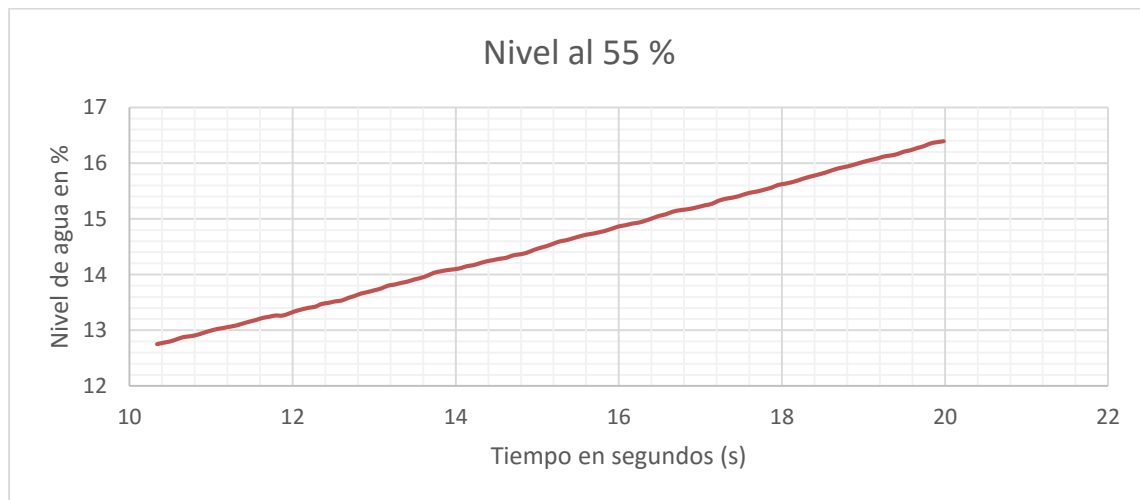
En la figura 62 se muestra la dispersión que se obtiene al realizar el promedio de las 12 mediciones realizadas, colocando la velocidad de la bomba al 50 % en el inicio del proceso es posible notar el tiempo que tarda la bomba en estabilizarse y empezar a bombear agua con regularidad, la curva roja denota el nivel de agua por segundo transcurrido, la recta punteada en celeste es una recta que denota la linealidad de la curva, al alcanzar un tiempo igual a 2,34 segundos

es cuando la bomba se ha estabilizado por completo y el aumento de nivel puede notarse de forma lineal.

Por lo tanto, se sabe que la bomba tiene 2,34 segundos de retardo, lo cual puede tomarse como el *lag time* del sistema, que en español significa tiempo de retardo o retraso.

El nivel de agua que se marca en el eje vertical, está descrito en porcentaje, esto es porque al momento de obtener la variable proporcional la misma debe expresarse sin dimensión, tomando el nivel máximo como de 294 milímetros, se utiliza como denominador para cada uno de los valores de nivel, con esto obtiene la gráfica directamente en porcentaje y se evitan problemas posteriores con las dimensiones de las variables encontradas.

Figura 63. Nivel de agua con CV al 55 %



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para encontrar la constante proporcional es necesario conocer la pendiente de la tangente de la curva, para esto se tomará como punto de partida el centro de la curva, dado que es casi lineal el valor obtenido será adecuado para calcular la constante proporcional.

El valor central de tiempo es de 15,16 segundos, tomando un segundo adelante del punto central y un punto atrás, se tienen los dos puntos necesarios para calcular la pendiente de una recta, para ello se utilizarán los puntos obtenidos por el programa, se realizará el cálculo y se tomará el valor más cercano obtenido por el medidor.

Tabla XI. **Punto pendiente al 55 %**

Al 55 %			Puntos en X & Y	
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X
A134	A253	Aprox. A194	14,1686903	14,2188182
10,3373636	19,985	15,1611818	14,9159322	16,1657273

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Como se puede apreciar en la tabla XI, tomando el valor central de tiempo, se desplaza un segundo atrás y uno adelante, luego se toman en el eje x los valores de tiempo reales, significa, los tiempos medidos por el módulo de adquisición, luego de encontrarlos simplemente se toman los datos de los puntos en y que corresponden al nivel de agua en porcentaje que se tiene en ese determinado instante de tiempo, con estos puntos es posible encontrar la pendiente que se genera al tener la velocidad de la bomba a un 55 % realizando la siguiente operación.

$$m = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{14,91 - 14,16 \%}{16,16 - 14,21 s} = 0,38 \text{ \%}/s \quad (33)$$

Una vez encontrada la pendiente se puede proceder a aplicar la ecuación de Ziegler y Nichols para encontrar la constante proporcional K_p para un control PID.

$$K_p = \frac{(1,2)(\Delta CV)}{(L_t)(N)} \quad (34)$$

En la ecuación mostrada, ΔCV es el cambio realizado a la variable de control el cual aumentó del 50 al 55 % por lo cual se tiene un cambio del 5 %, el término L_t es conocido como el tiempo de retardo que existe entre el accionamiento del actuador hasta alcanzar su función regular, que fue determinado previamente con un valor de 2,34 segundos, por último se tiene el valor de N el cual es la pendiente obtenida de la medición de nivel al 55 % de la velocidad de la bomba, la cual tiene un valor de 0,38 %/s.

Conociendo todos los valores de la ecuación, simplemente debe sustituirse en la ecuación para conocer el valor de la constante proporcional.

$$K_p = \frac{(1,2)(5 \%)}{(2,34 \text{ s})(0,38 \%/\text{s})} = 6,68 \quad (35)$$

Como resultado de aplicar la ecuación, se obtiene una constante proporcional la cual no tiene dimensión, ya que se anulan las dimensiones al momento de aplicar la ecuación, como resultado se tiene un valor constante que representa la proporción del error con la cual se corregirá el mismo.

Para conocer el valor de las constantes integral y derivativo, se necesita el tiempo de retardo y las ecuaciones son sencillas de aplicar, estas se presentan a continuación.

Para la constante integral se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_i = (2)(L_t) = (2)(2,34 \text{ s}) = 4,68 \text{ s} \quad (36)$$

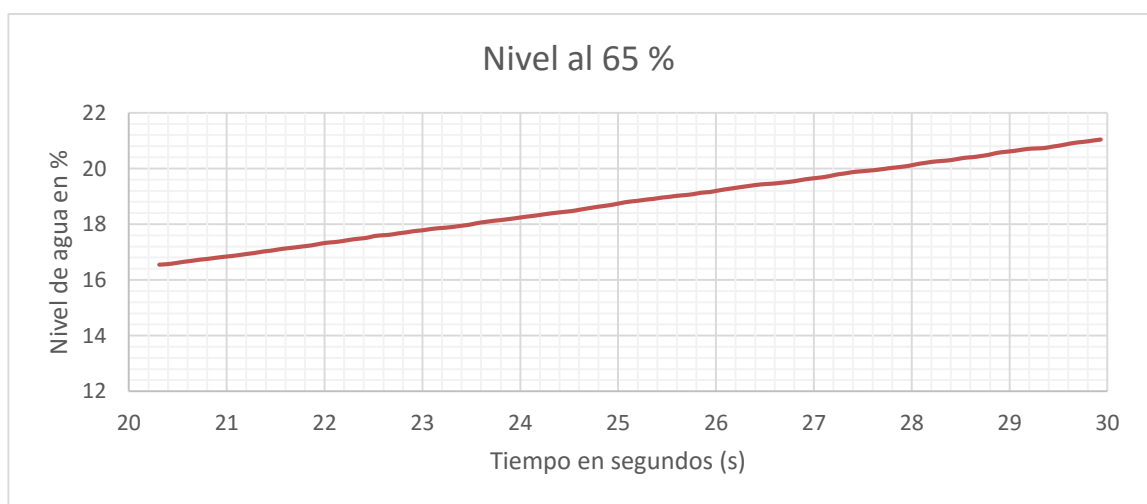
Para la constante derivativa se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_d = (0,5)(L_t) = (0,5)(2,34 \text{ s}) = 1,17 \text{ s} \quad (37)$$

Con los cálculos realizados anteriormente, se cuenta con los datos suficientes para implementar el control PID dado que se conocen las tres constantes de control.

Para ajustar la constante proporcional de manera que no sea muy pequeña ni tampoco muy elevada, se calculará la constante proporcional con la CV al 65 % de manera que se pueda obtener un promedio de la constante proporcional.

Figura 64. **Nivel de agua con CV al 65 %**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para encontrar la pendiente de la curva, al igual que el caso anterior, se tomará el punto central de la curva al 65 % y luego se tomarán los puntos de 1 segundo de diferencia con el punto central, los datos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XII. **Punto pendiente al 65 %**

Al 65 %			Puntos en X & Y	
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X
A 257	A 375	Aprox. A 316	18,2986133	24,1387273
20,3103636	29,9328182	25,1215909	19,2889676	26,178

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Como se muestra en la tabla XI, los puntos A 257 y A 375 son las celdas en el archivo de Excel en donde se encuentran los tiempos del inicio y el final de la curva donde se aplicó el 65 % de la CV, una vez determinados los puntos en el eje del tiempo, se toman los correspondientes en el eje vertical, con dos puntos determinados es posible conocer la pendiente con la siguiente ecuación:

$$m = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_2} = \frac{19,28 - 18,29}{24,13 - 26,17} = 0,48 \text{ \%}/s \quad (38)$$

Una vez encontrada la pendiente se puede proceder a aplicar la ecuación del método Ziegler y Nichols.

$$K_p = \frac{(1,2)(\Delta CV)}{(L_t)(N)} = \frac{(1,2)(10 \text{ \%})}{(2,34s)(0,48 \text{ \%}/s)} = 10,55 \quad (39)$$

Finalmente se calcula el promedio de las constantes proporcionales al 55 y al 65 % de la CV con lo cual se obtiene un valor más fiable para aplicar al control PID.

$$K_{pprom} = \frac{K_{p55\%} + K_{p65\%}}{2} = \frac{6,68 + 10,55}{2} = 8,62 \quad (40)$$

Con esto se conocen las tres variables del control teniendo Kp con un valor de 8,62, Ti con un valor de 4,68 segundos y Td con un valor de 1,17 segundos, ahora estos datos deben ser utilizados para desarrollar el control PID y verificar que el método cumpla con la condición de alcanzar la estabilidad en no más de tres oscilaciones.

Tabla XIII. **Resumen de resultados del mapeo de nivel**

K_p	8,62
T_i	4,68 s
T_d	1,17 s

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.4. Mediciones de flujo de agua

Para realizar las mediciones de flujo, inicialmente se debe configurar el software para hacer un buen uso del sensor, en el caso del sensor de flujo, este es un sensor que da como respuesta una señal de frecuencia de 40 a 1 200 Hz y mide el caudal en un rango de 0,3 a 9,0 l/min.

Para realizar el trazado del sensor se puede calcular la pendiente con los datos de rangos mínimos y máximos que se tienen pero en este caso existe el

inconveniente que para poder ser medido por el módulo de adquisición, es necesario que su magnitud eléctrica sea en voltios, por esta razón el sensor de caudal cuenta con una placa de control que transforma su salida de frecuencia a una salida de 0 a 10 Vdc, de manera que los datos puedan ser procesados adecuadamente.

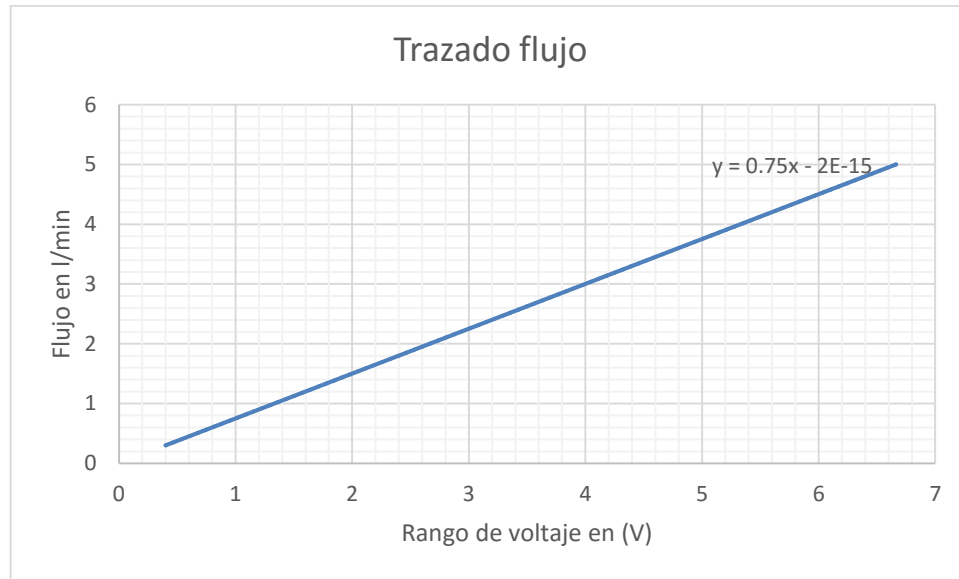
En el caso de la tarjeta electrónica que convierte la señal de frecuencia a voltaje se tiene un inconveniente, dicha tarjeta puede medir de 40 a 1 000 Hz y lo transforma a una señal de voltaje de 0 a 10 Vdc.

Esto se indicó previamente al inicio de este capítulo, podría existir una saturación al momento de medir valores por encima de 1 000 Hz, por esa razón se hizo el cálculo con la limitante que la bomba centrífuga tiene una capacidad máxima de 5 l/min lo que da un voltaje máximo de 6,66 Vdc, lo que se traduce en 666 Hz.

Además, la conversión de la tarjeta es totalmente lineal, por lo que se podría trazar el rango de voltaje conociendo el rango de frecuencias a medir que sería de entre 40 a 666 Hz, con un rango de 0,4 a 6,66 Vdc y un caudal de 0,3 a 5 l/min que es el máximo de la bomba centrífuga.

Con los datos anteriormente desarrollados, se realiza el trazado de la siguiente recta:

Figura 65. **Pendiente del sensor de caudal**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se expone en la figura 65, se tiene el trazado con los rangos máximos y mínimos tanto de voltaje como de caudal, con ello es posible linealizar y obtener la ecuación del gráfico de la cual el valor útil es la pendiente, ya que en este caso el desplazamiento que se tiene es muy pequeño como para tomarse en cuenta en la configuración de medición del software.

Otra forma de obtener el dato de la pendiente sería utilizando los puntos mínimos y máximo en una ecuación como se muestra a continuación:

$$\text{Factor o pendiente} = \frac{5 \text{ l/min} - 0,3 \text{ l/min}}{6,66 \text{ V} - 0,4 \text{ V}} = 0,75 \quad (41)$$

Con la ecuación anterior se encuentra el valor para configurar el factor aplicado a las señales de voltaje recibidas por el módulo de adquisición, como se mencionó previamente, el desplazamiento vertical tiene un valor muy pequeño para colocarse de valor *offset*, dado que este valor es del orden de $1 * 10^{-15}$ lo que significan quince ceros después del punto decimal, este valor es indiferente al momento de colocarlo como *offset* ya que no se pueden colocar valores tan pequeños, porque en la casilla para valores *offset* solo pueden ser colocados valores de tres decimales como máximo.

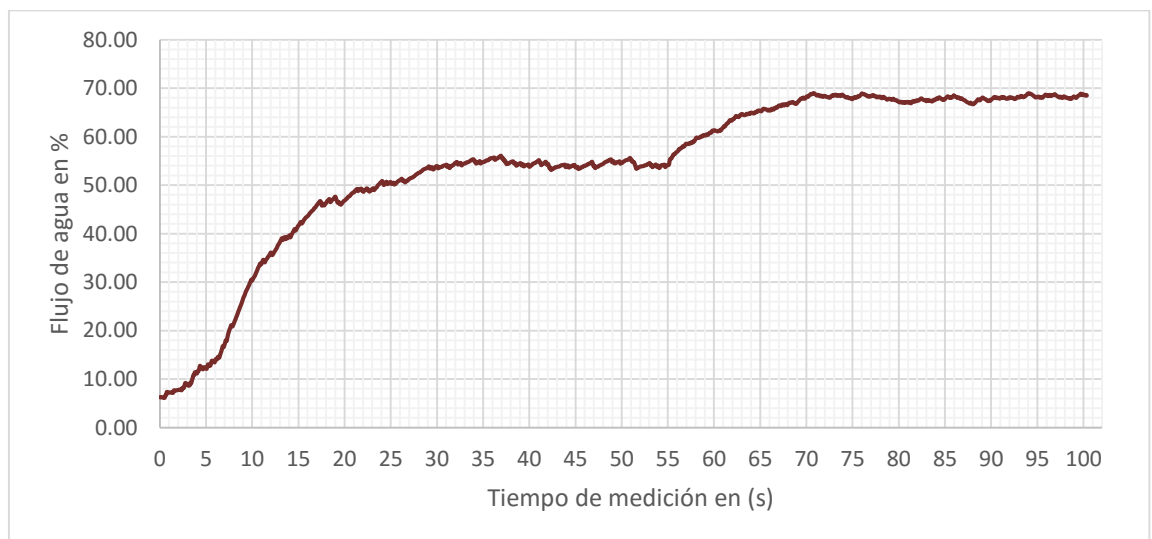
En la ventana de medición, se debe seleccionar como parámetros de medición, la bomba centrífuga y el flujo de agua para que sean graficados los datos correspondientes, además de activar el bit 2 que es el que acciona el módulo PWM de la bomba de manera que pueda ser regulada.

En la figura 66 son mostrados los resultados de una medición de flujo, su comportamiento es curvo y con una concavidad hacia abajo, inicialmente se da un crecimiento para luego alcanzar un valor estable, esto se da porque al establecer un valor de control para la bomba centrífuga esta mantiene una velocidad constante, lo que da como resultado un flujo constante.

Esto demuestra el comportamiento que se ve graficado, al establecerse una CV para el control de la bomba centrífuga, la PV cambia constantemente hasta alcanzar un flujo constante, claro este flujo no es totalmente estable y constante dado que el sensor de flujo mide por frecuencias y el movimiento del agua, a través de la bomba puede llevar cierta cantidad de burbujas, además de la vibración que se genera en la tubería al momento de bombear produce una variabilidad en la medición, pero en términos generales es posible decir que se ha alcanzado la estabilidad.

Se inicia el proceso para la prueba de nivel con un 40 % de la velocidad de la bomba, esto durante un tiempo muy corto dado que a una velocidad baja se tiene una deficiencia en cuanto al calentamiento y puede ser perjudicial para la bomba centrífuga, luego se aumenta a un 60 % durante un tiempo menor a un minuto para luego finalizar con la velocidad al 80 % y poder conocer el comportamiento del proceso de medición de flujo, esto para aplicar el método Ziegler y Nichols con el fin de obtener los parámetros PID.

Figura 66. **Prueba de medición de flujo**



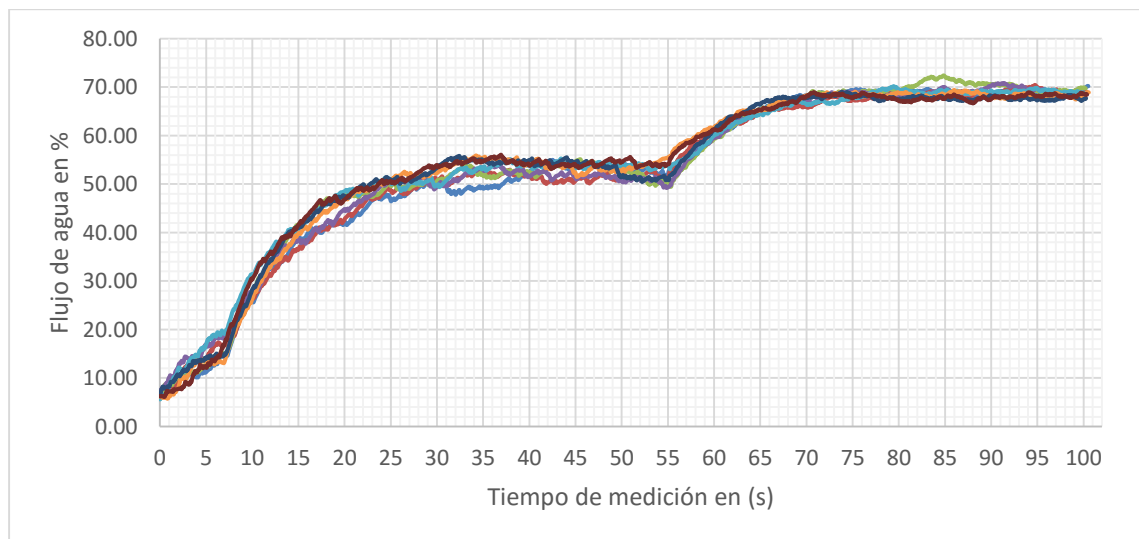
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 67 es posible apreciar el comportamiento del sistema de flujo después de realizar varias pruebas consecutivas e intentando mantener los mismos puntos iniciales, y generando los cambios en los mismos tiempos para cada una de las pruebas.

El comportamiento de cada una de las pruebas es muy similar ya que esto depende de las condiciones del sistema, el tipo de líquido utilizado, las características de la bomba y del sensor, la tubería, estas condiciones permanecen sin cambios ya que la tubería mantiene las mismas dimensiones en todo el trayecto, además que el trayecto es el mismo.

Las pequeñas variaciones que se muestran en las curvas son debidas a pequeñas perturbaciones que se dan tanto en la bomba centrífuga, dado que no es un instrumento de alta precisión y en el sensor dadas las mismas condiciones. En términos generales es posible tomar las curvas como válidas pero para efectos de tener datos confiables se realizará el promedio de estas curvas y de ese promedio se obtendrán los parámetros PID para el control del proceso.

Figura 67. **Dispersión general de flujo**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

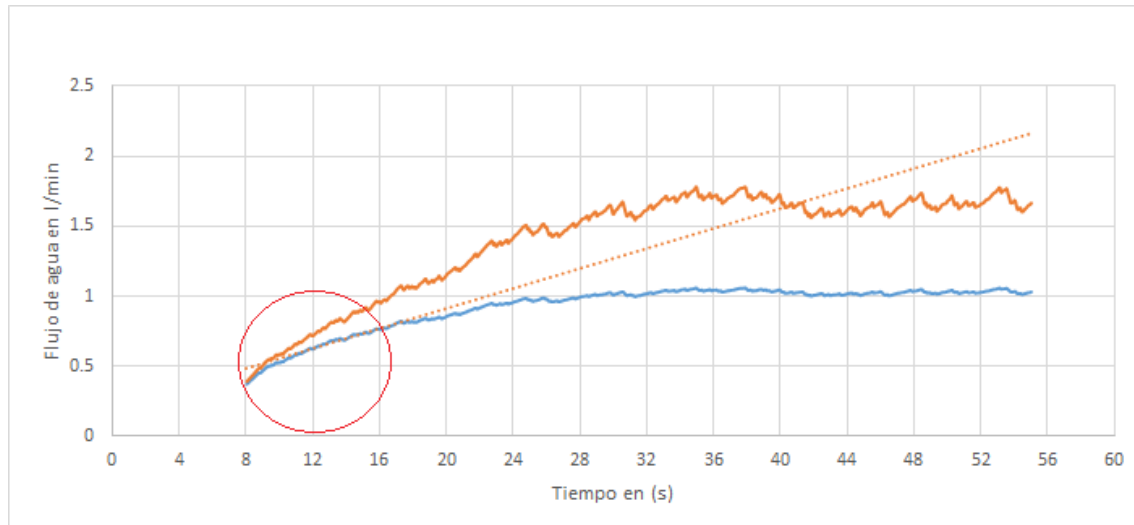
Para tomar adecuadamente las muestras para el método Ziegler y Nichols se toma como variable de control la velocidad de la bomba, esto porque la velocidad de la bomba es la que determina el caudal o flujo de agua en la tubería, se inicia con una CV al 40 % durante un período de siete segundos, este intervalo de tiempo debe ser corto ya que la bomba trabaja con un aumento gradual y acumulativo de temperatura.

Luego de los siete segundos donde se ha alcanzado una estabilidad regular se incrementa súbitamente la CV al 60 %, esto es un 20 % de incremento al sistema y se espera un tiempo prudencial hasta que se estabilice la PV esto es a los 47 segundos después de hacer el incremento, este dato se estableció luego de la primera prueba y se mantuvo para las pruebas posteriores ya que se necesita que todas las pruebas reúnan las mismas condiciones.

Luego de alcanzar ese punto a los 54 segundos de iniciado el proceso se incrementa nuevamente un 20 % de la CV, con lo que se obtiene un 80 % de la velocidad de la bomba y nuevamente se deja un tiempo prudencial hasta que la PV se estabilice y se alcanza la estabilidad a los 98 segundos.

Antes de iniciar el proceso formal se debe hacer uso de los datos promedios y obtener su curva tangente para determinar el tiempo de retardo generado por la bomba centrífuga, con este tiempo de retardo es posible conocer las constantes integral y derivativa para luego avanzar con la constante proporcional la cual lleva un rumbo diferente y más elaborado.

Figura 68. **Curva tangente**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para obtener el tiempo de retardo primero es necesario entender lo que plantean las dos curvas y la recta respectiva, la curva celeste es el resultado del mapeo realizado al equipo aplicado a un sistema de control de flujo, se nota el comportamiento de incremento de flujo hasta el momento en que se estabiliza e inicia en el punto donde se realiza el incremento de velocidad del 40 al 60 %, la curva naranja fue elaborada con base en la curva celeste con la salvedad de que se obtuvo la tangente de la curva celeste en cada punto.

Se realizó de esa forma ya que para un patrón de datos del cual no se tiene una ecuación fija, lo más factible es obtener la tangente de los valores trazados, graficar los valores y luego linealizar dicha tangente.

La línea recta de color naranja es la linealización de la curva de valores tangentes, esta línea determina el punto donde el sistema ha alcanzado la

respuesta adecuada, es decir, el punto a partir del cual la bomba centrífuga está funcionando de manera regular, ya que desde el momento donde ocurre el cambio de la CV tarda un tiempo definido para que la PV reaccione a la orden enviada, esto significa que el tiempo que tarda la bomba centrífuga desde que se envía la señal hasta donde vence la inercia y el agua fluye con regularidad se determina como tiempo de retardo.

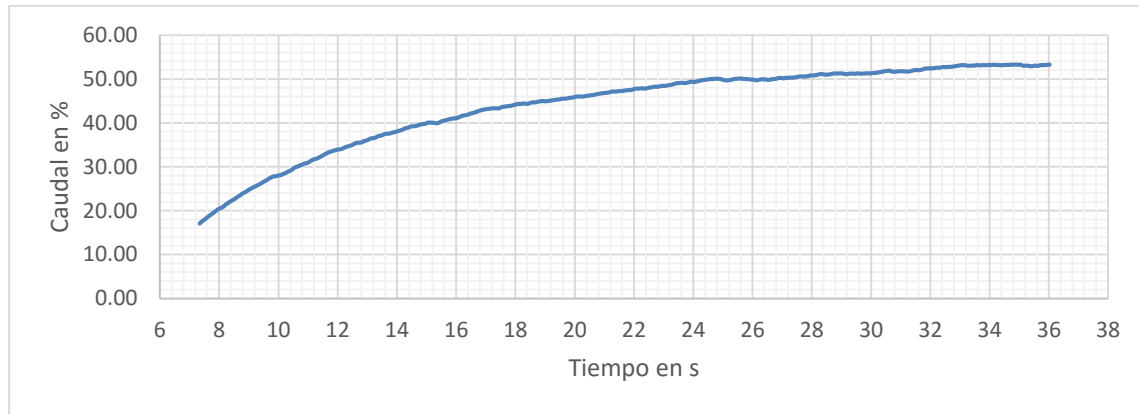
Para encontrar el tiempo de retardo se parte del punto inicial del aumento de la CV que es a los 8,061 segundos y se toma el punto en donde se intersecta la línea tangente y esto es a los 10,397 segundos, para conocer el tiempo de retardo se realiza una simple resta de ambos valores.

$$L_t = 10,397 \text{ s} - 8,061 \text{ s} = 2,336 \text{ s} \quad (42)$$

Se obtiene un tiempo de retardo de 2,336 segundos, con este valor es posible encontrar las constantes integral y derivativa.

El próximo paso es encontrar la constante proporcional a través del análisis de cada uno de los pasos del método Ziegler y Nichols.

Figura 69. **Mapeo de flujo al 60 %**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se refleja en la figura 69, se muestra una curva exponencial negativa similar a la carga de un capacitor, esta incrementa desde su inicio hasta el momento donde ha alcanzado una velocidad estable, la cual es determinada por la CV de la bomba centrífuga que en este caso particular es el 60 % de la velocidad de la bomba, esta curva fue obtenida al realizar el promedio de todas las mediciones realizadas y tratando en la medida de lo posible reproducir las mediciones lo más cercanas posibles.

Para encontrar la pendiente se puede realizar una aproximación aceptable al determinar el punto inicial y otro punto intermedio que cubran con una línea recta la mayor parte de la curva, esto puede ser un tanto subjetivo para determinar la máxima porción de curva abarcada, la forma de comprobar si la constante obtenida es la adecuada es aplicando el control PID y verificando que se obtiene una estabilidad a una perturbación o cambio de punto de regulación en tres oscilaciones o menos.

Después de varias pruebas de linealización de la curva se encuentra la pendiente desde el punto inicial a los 7,337 segundos, hasta el punto donde se alcanzan los 12,008 segundos de proceso, estos puntos fueron tomados de la base de datos para que concuerden con un valor medido de flujo, los valores de flujo de acuerdo a los tiempos encontrados son desde el 17,03 % hasta donde se alcanza el 33,92 % de la capacidad de flujo.

Aplicando los valores para encontrar la pendiente de la curva se tiene lo siguiente:

$$m = \frac{33,92 \% - 17,03 \%}{12,008 s - 7,337 s} = 3,61 \%/s \quad (43)$$

Con lo cual se cuenta con los datos necesarios para calcular la constante proporcional del proceso, ya que se conoce el aumento de la CV del 40 al 60 %, se sabe que hubo un cambio del 20 % con lo que se conocen los datos necesarios para calcular la constante proporcional.

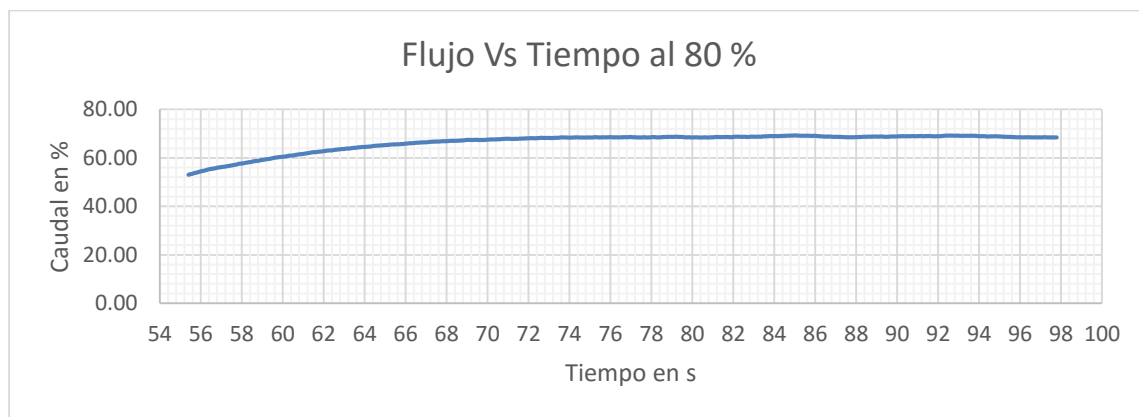
$$K_p = \frac{(1,2)(\Delta CV)}{(L_t)(N)} = \frac{(1,2)(20 \%)}{(2,336 s)(3,61 \%/s)} = 2,84 \quad (44)$$

Al igual que cuando se aplicó el método Ziegler y Nichols con el control de nivel de agua, es lo más adecuado aplicarlo en este caso particular de flujo, para tener valores más balanceados en caso de aumentos grandes del punto de control o perturbaciones marcadas en el sistema y que dicho sistema esté capacitado tanto para rangos de trabajo grandes y pequeños, claramente habrá una falta de precisión ya que se deben realizar las pruebas bajo las condiciones en las que se trabajará.

Para el experimento se tomará una capacidad más estándar del caso, no solo para corroborar el funcionamiento del método sino para experimentar y comprender como afectan estas decisiones a los resultados obtenidos.

Para promediar la constante proporcional se necesita analizar la curva característica al 80 % y obtener su pendiente, de esa forma se obtiene la constante proporcional para una CV del 80 % y luego se realiza el promedio con la constante proporcional con una CV del 60 %.

Figura 70. **Mapeo de flujo al 80 %**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se aprecia en la figura 68, se muestra el mismo comportamiento exponencial negativo parecido a la carga de un capacitor, tiene una diferencia clara con el mapeo realizado al 60 % en que se alcanza un valor estable en un tiempo más corto, esto es porque ya se tiene una inercia elevada y es más sencillo romper la inercia o el esfuerzo realizado es menor dado que se parte de una velocidad elevada.

Luego de linealizar la curva repetidas veces con el punto inicial de 55,39 segundos hasta diferentes puntos antes de alcanzar la estabilidad, se obtuvo que la pendiente que abarca de forma tangente la mayor parte de la curva, se encuentra al linealizar desde el punto inicial hasta el punto donde se alcanzan los 60,65 segundos, que corresponde a un valor medido y tiene asociado un valor de flujo, esto se hace para evitar la necesidad de interpolar y además que los datos estén dentro de los valores medidos.

Con los valores de tiempo solo es necesario agregar los valores correspondientes de flujo para encontrar la pendiente que se realiza a continuación:

$$m = \frac{61,27 \% - 52,99 \%}{60,65 s - 53,39 s} = 1,57 \%/s \quad (45)$$

Conociendo la pendiente se pueden realizar los cálculos para obtener el valor de la constante proporcional, esto conociendo de antemano que se aumentó la CV del 60 al 80 % lo cual da un aumento de 20 % al sistema.

$$K_p = \frac{(1,2)(\Delta CV)}{(L_t)(N)} = \frac{(1,2)(20 \%)}{(2,336 s)(1,57 \%/s)} = 6,54 \quad (46)$$

Conociendo la constante proporcional al 80 y al 60 % se puede realizar el promedio de ambas para tener un rango de trabajo estándar para perturbaciones o cambios grandes y también para cambios pequeños, es decir que el sistema podrá trabajar dentro de un rango aceptable de perturbaciones en el sistema.

Finalmente se obtiene el promedio de la constante proporcional utilizando los valores obtenidos al 60 % de la velocidad nominal de la bomba centrífuga y al 80 %, lo cual se ve aplicado en la siguiente ecuación:

$$K_{pprom} = \frac{K_{p60\%} + K_{p80\%}}{2} = \frac{2,84 + 6,59}{2} = 4,69 \quad (47)$$

Con esto se determina la constante proporcional para el sistema de control, únicamente quedan restantes los cálculos para las constantes integral y derivativa que se desarrollan a continuación:

$$T_i = (2)(L_t) = (2)(2,336) = 4,672 \text{ s} \quad (48)$$

$$T_d = (0,5)(L_t) = (0,5)(2,336) = 1,168 \text{ s} \quad (49)$$

Con las ecuaciones anteriores se determinan los valores de las constantes integral y derivativa, se puede notar que sus valores son muy cercanos a las constantes encontradas para el control de nivel de agua dado que el agua mantiene sus características siendo la misma, además, las tuberías tienen el mismo trayecto y dimensión finalizando con la bomba centrífuga que es la misma, se puede decir que estas constantes están muy ligadas al tiempo de respuesta del sistema, importando únicamente las características del actuador y las condiciones de funcionamiento.

Tabla XIV. **Resumen de resultados del mapeo de flujo**

K_p	4,69
T_i	4,672 s
T_d	1,168 s

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PID VIRTUAL PARA LOS PROCESOS DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE AGUA CON LA PLATAFORMA FLUID LAB-PA

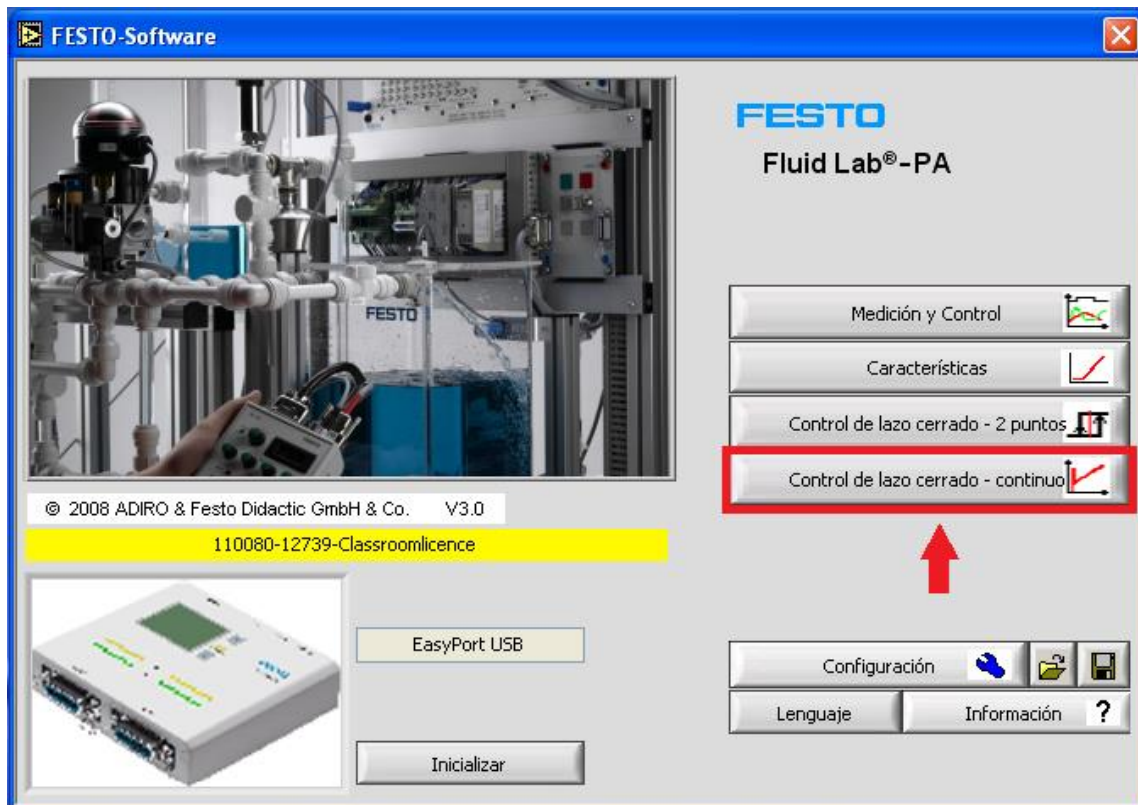
Para implementar un control PID en cualquier proceso es necesario contar previamente con los parámetros PID de los equipos, luego de ello se utilizan esos parámetros para aplicar el lazo de control realimentado del proceso deseado y el mismo funcionará con los parámetros utilizados.

Si los parámetros son correctos, el sistema mantendrá el punto de consigna requerido y lo deberá alcanzar en un máximo de 3 oscilaciones después de alcanzar el punto de consigna, además, el sistema debe reaccionar y regularse ante cualquier perturbación externa al sistema para mantenerlo estable.

4.1. Implementación de control PID para nivel de agua

Para la implementación del control PID se utiliza la función de control de lazo cerrado continuo de Fluid Lab PA, en la figura 71 se muestra la pantalla inicial y el acceso a la opción de control de lazo cerrado.

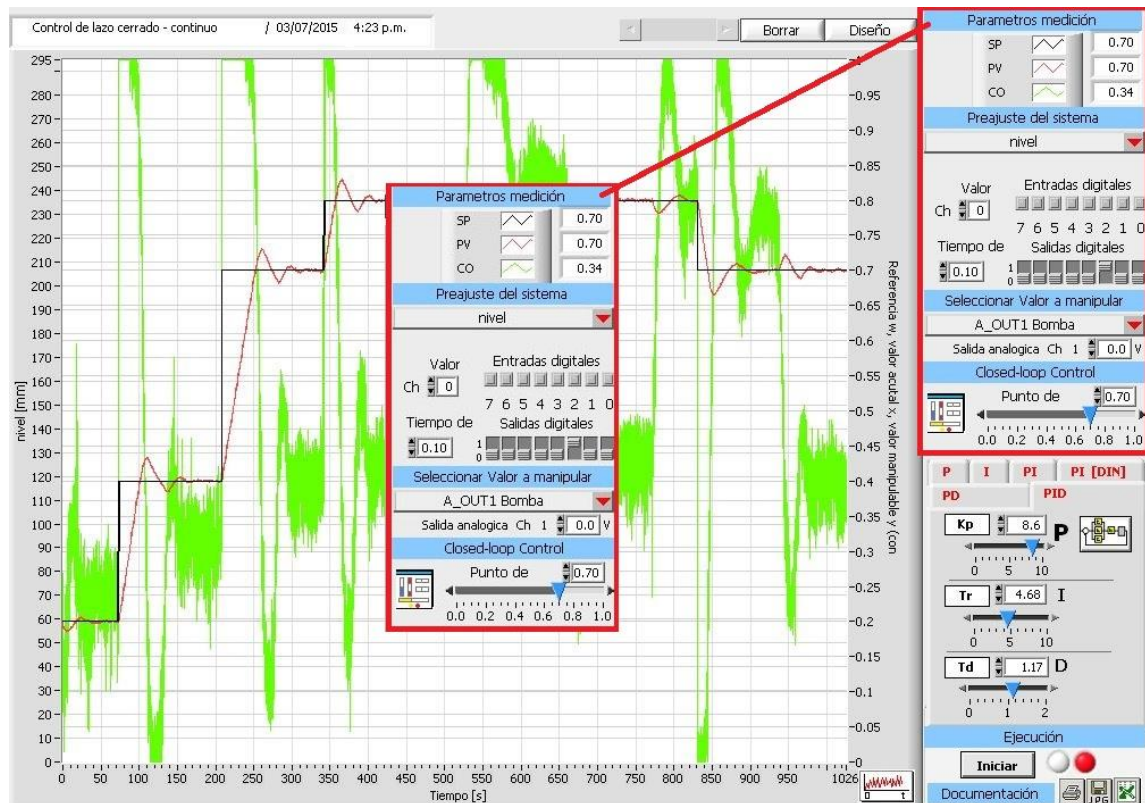
Figura 71. Acceso a control de lazo cerrado continuo



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

Luego de elegir la opción control de lazo cerrado continuo de la ventana mostrada en la figura 69, el software mostrará la ventana de la figura 70 en la cual puede ser implementado un control a la elección del usuario, puede ser un control P, I, PI, PI[DIN], PD y PID. Para efectos de la implementación de los datos anteriormente obtenidos del mapeo de los equipos para un control de nivel de agua es necesario seleccionar la opción de control PID, una vez seleccionada se mostrarán las respectivas variables proporcional, integral y derivativa donde se deben colocar los datos respectivos obtenidos del mapeo de los equipos.

Figura 72. Ventana control de lazo cerrado continuo, bloques



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 72 es posible notar la ventana de control de lazo cerrado continuo donde se resalta un bloque de parámetros, preajustes, valor a manipular y *closed loop* control, explicando paso a paso, en los parámetros de medición puede apreciarse tres parámetros SP, PV y CO donde SP es el punto fijado para el proceso el cual se espera alcanzar luego de realizar las acciones de control y regulación.

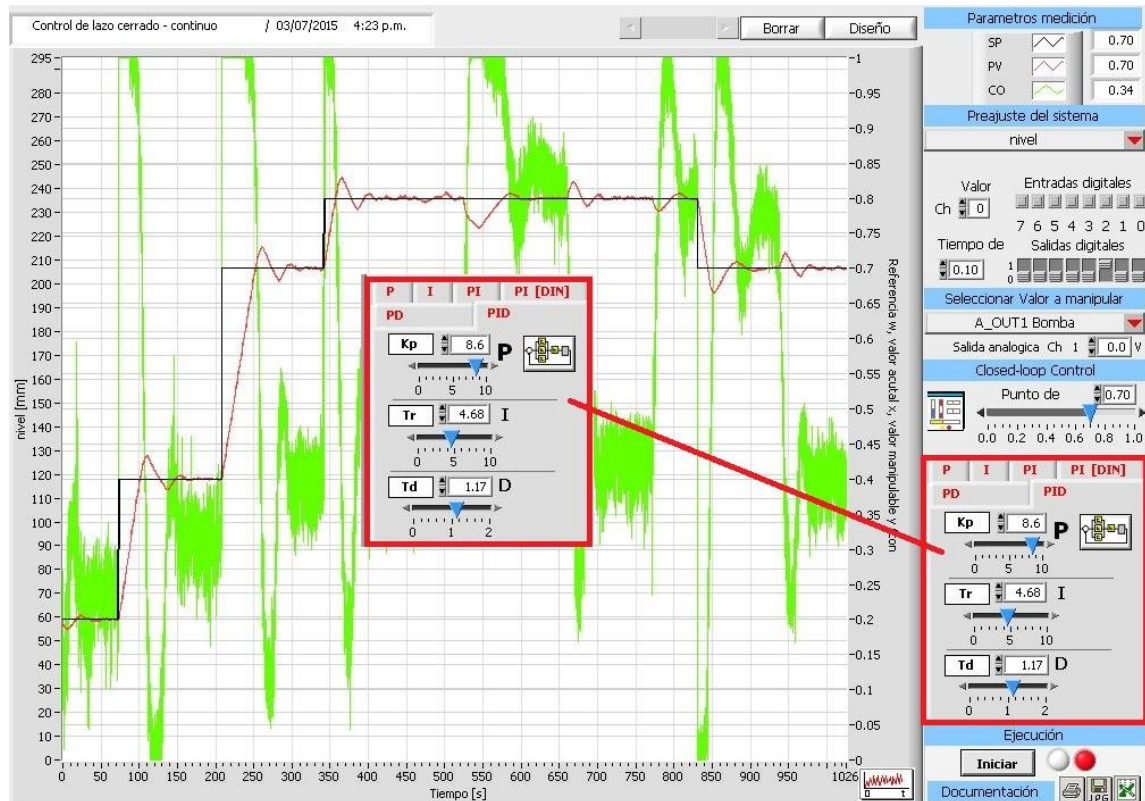
El PV es la variable de proceso, para este caso específico es el valor entregado por el sensor, el cual dice el estado físico actual del sistema en el caso de este proceso de nivel indica el nivel del tanque de agua en mm de altura, la

variable CO es la variable que controla el voltaje enviado a la placa PWM de la bomba centrífuga la cual cambia según el error comprendido entre SP y PV.

En el bloque de preajuste del sistema inicialmente se selecciona el proceso que se va a realizar, para este paso específico se realizará un control de nivel de agua, por lo tanto se necesita escoger la opción nivel. A continuación se tienen las entradas digitales, las cuales son luces led que simulan la interacción con las entradas, dicho de otra forma, marca en color verde si alguna entrada está activa y en color gris si alguna entrada no está activa.

Para las salidas digitales es necesario configurar como activo el bit 2 que es el que activa la placa PWM de la bomba centrífuga para poder regularla y desactiva el modo *on/off*, el canal utilizado para la bomba centrífuga es el canal cero, en el bloque seleccionar valor a manipular se elige la salida de la bomba centrífuga y finalmente el *closed loop control* es el bloque donde se puede modificar el SP que es el punto deseado del nivel, el cual está en valor unitario de 0 a 1 que representan respectivamente 0 y 295 mm, este valor puede ser modificado en cualquier momento durante la prueba del control PID para verificar que el sistema alcanza la estabilidad en un corto tiempo y de manera eficiente.

Figura 73. Ventana control de lazo cerrado continuo, parámetros

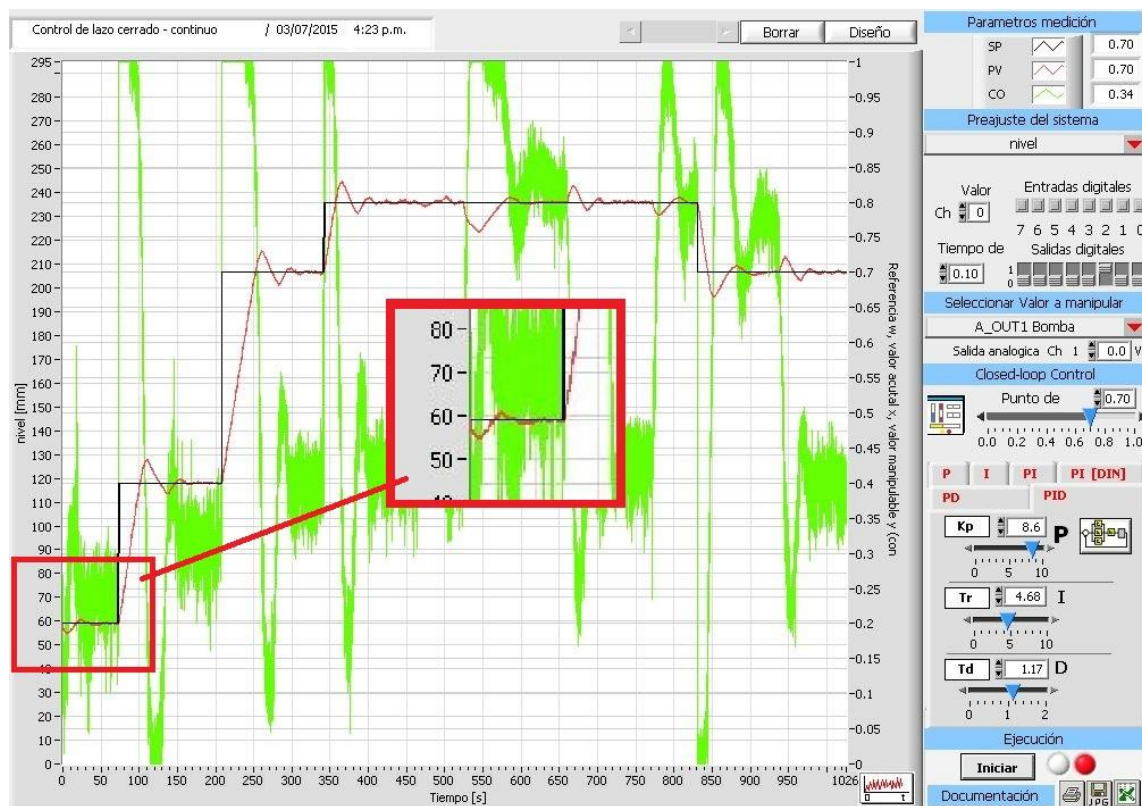


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En el bloque de controles mostrado en la figura 73 se selecciona el control PID ya que los datos obtenidos del mapeo fueron para un control PID, al escoger el tipo de control se despliegan los valores K_p , T_r y T_d que son respectivamente la constante proporcional, la constante integral y la constante derivativa. Una vez colocados los datos respectivos se puede dar inicio a la prueba en el bloque de ejecución y presionando el botón iniciar, además de esa opción se tienen las opciones de guardar la información obtenida como imagen o los datos graficados en un archivo de texto para su posterior análisis.

En las siguientes figuras a continuación se explica paso a paso, cada una de las etapas del proceso y los resultados obtenidos con base en los datos de control PID.

Figura 74. Gráfica de control PID de nivel etapa 1



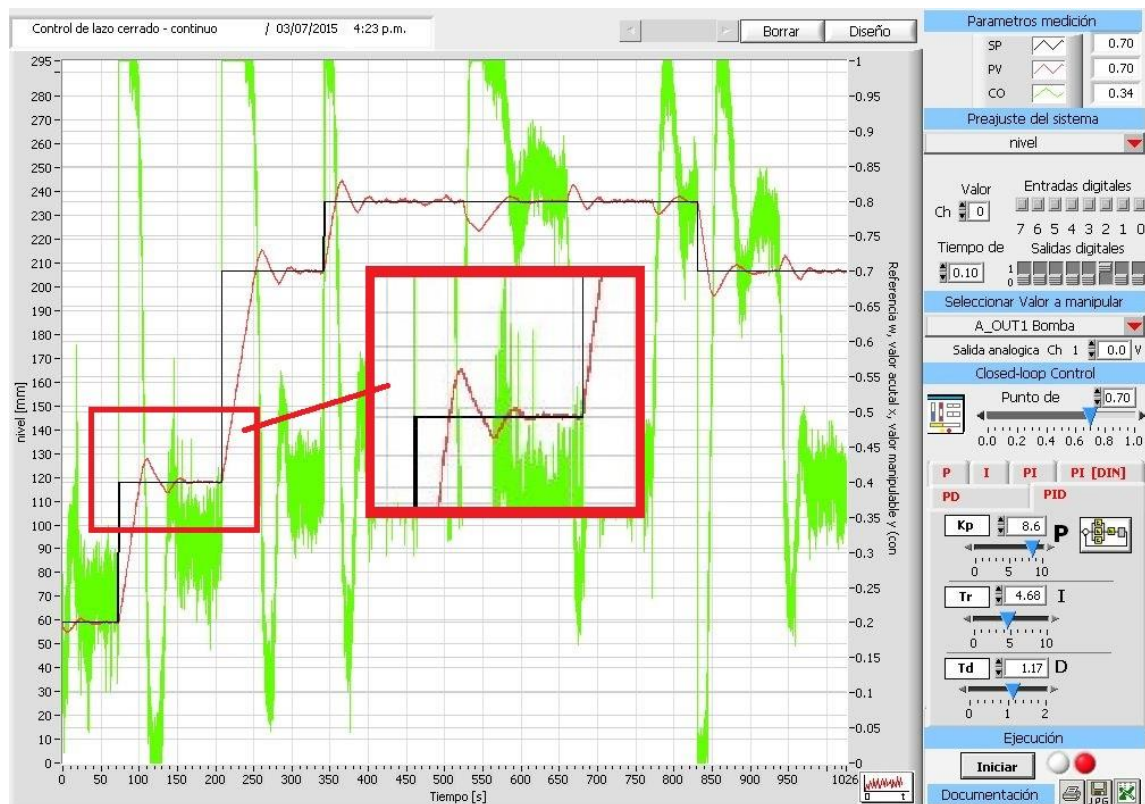
Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

La figura 74 muestra la etapa inicial del control PID, el cual se inicia con un SP de 0,2 que equivale a 60 mm de altura de agua. El tanque de agua ya se encontraba a una altura cercana a 60 mm al inicio del proceso, la línea negra determina el SP, la gráfica con línea roja muestra el nivel en tiempo real del tanque y la línea verde muestra el nivel de voltaje enviado el módulo PWM, se puede apreciar en el cuadro resaltado al centro de la imagen que rápidamente

alcanza el punto requerido, dado que como se indicó previamente el nivel del agua se encontraba cerca del nivel requerido.

Luego de alcanzado el nivel y para efectos de conocer la reacción del sistema y su eficiencia en cuanto a corregirse se aumenta el SP a 0,4 que equivale a un valor cercano a 120 mm.

Figura 75. Gráfica de control PID de nivel etapa 2

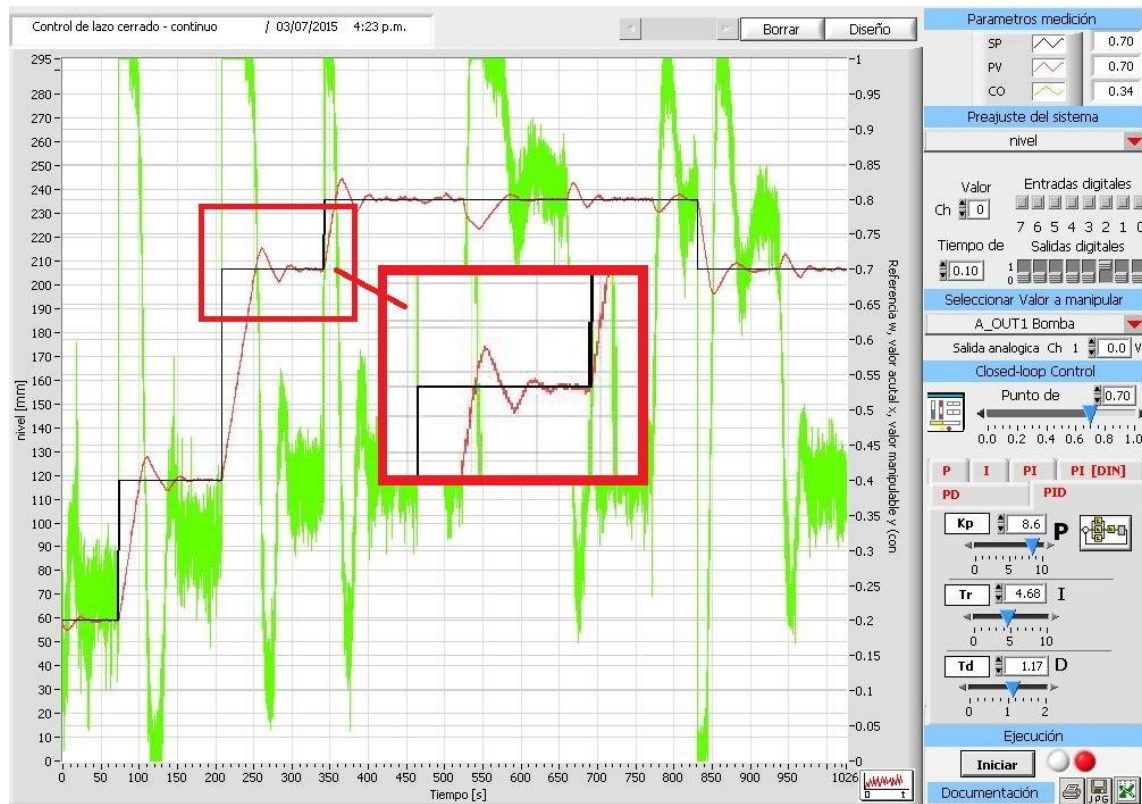


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

Como se muestra en la figura 75, al momento de aumentar el SP a 0,4 inmediatamente el control realiza las acciones de corrección necesarias para alcanzar el nivel requerido y le toma 3 oscilaciones para alcanzar el SP y

mantener regulado el proceso, simultáneamente se puede observar que al instante de incrementar el SP la CO incrementa súbitamente al máximo, para poder alcanzar el nuevo valor lo antes posible y se cruza con el máximo de la primer oscilación de la PV, reduciendo su valor súbitamente para tratar de alcanzar el SP que fue sobrepasado levemente y luego de la tercer oscilación se estabiliza.

Figura 76. Gráfica de control PID de nivel etapa 3

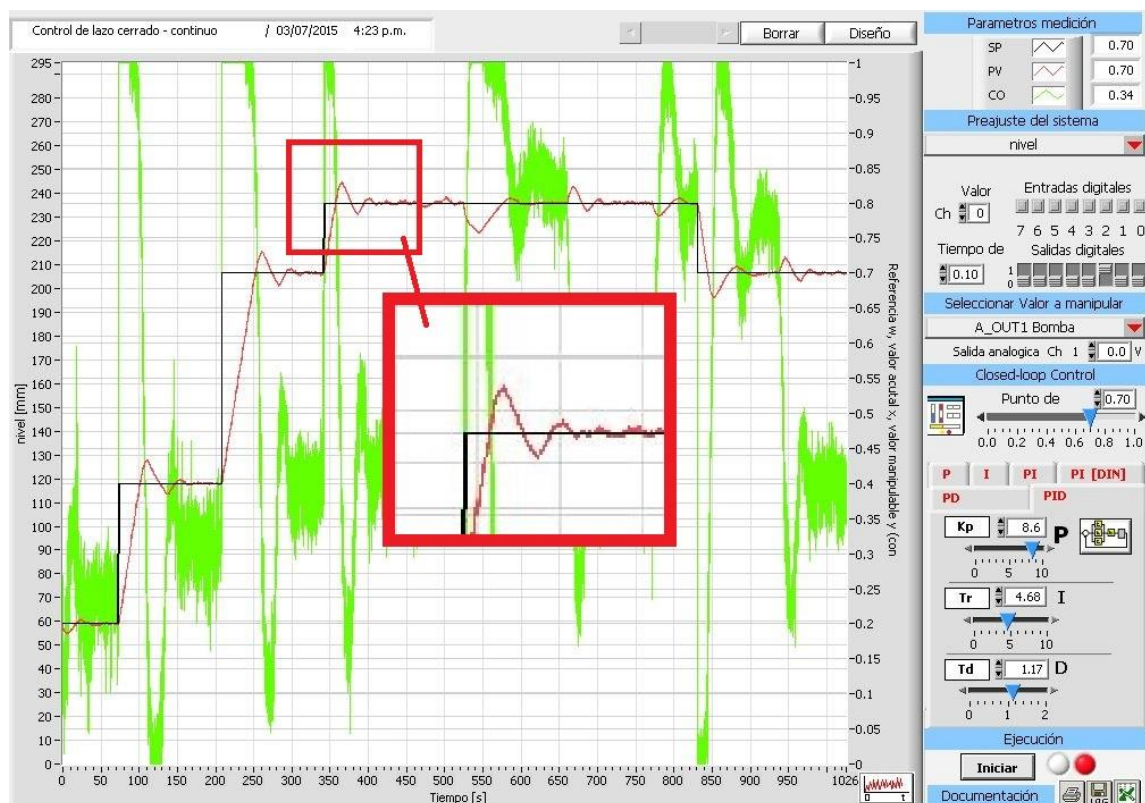


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la etapa 3 de la gráfica de control PID mostrada en la figura 76 se presenta un paso similar al paso 2, en este caso se incrementa nuevamente el SP esta vez a 0,7 que equivale a 205 mm de altura aproximadamente y se aprecia

como incrementa al máximo la CO que se muestra en color verde, para darle la mayor velocidad a la bomba centrífuga de manera que el nuevo punto de control sea alcanzado a la brevedad y una vez sobrepasado el punto la CO, baja súbitamente para intentar regular el nivel para alcanzar una estabilidad luego de tres oscilaciones.

Figura 77. Gráfica de control PID de nivel etapa 4

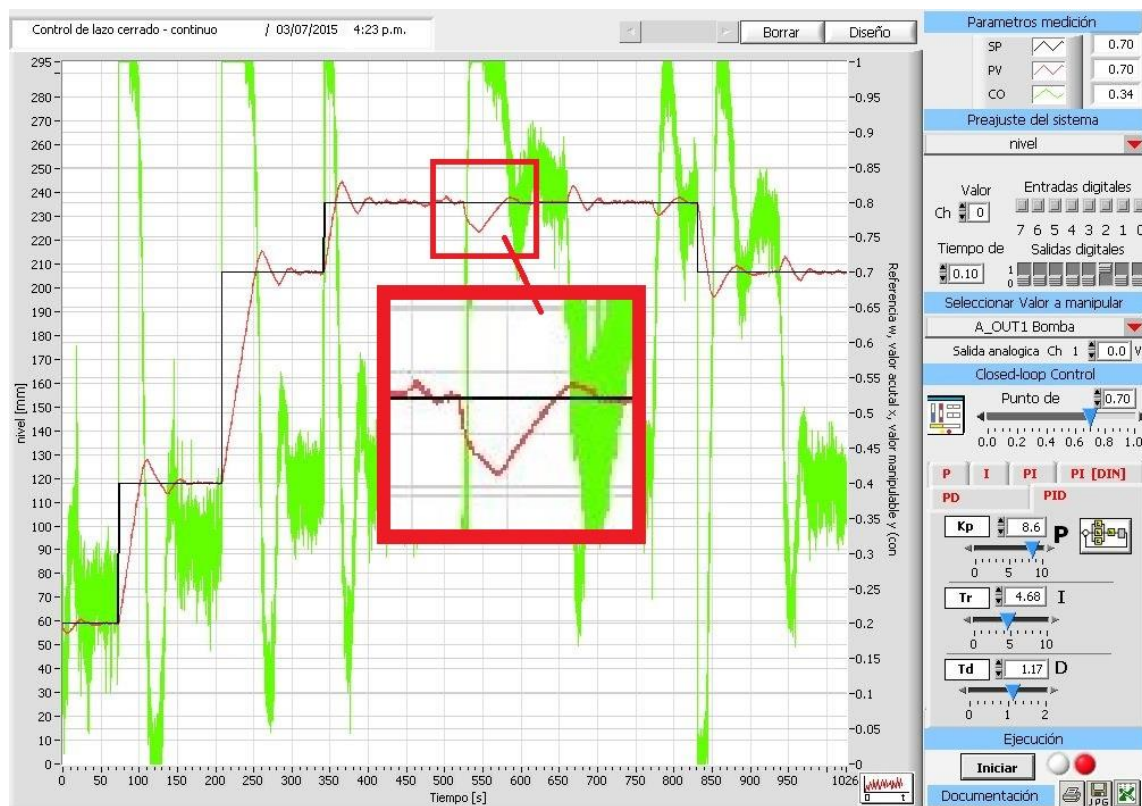


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 77 se incrementa nuevamente el SP esta vez a 0,8 que equivale a 235 mm de altura de agua aproximadamente resultando el mismo comportamiento que en las etapas 2 y 3, esto se realizó nuevamente para verificar que el SP se alcanzara en tres oscilaciones o menos y que esta

característica fuese reproducible sin importar el SP requerido, se puede apreciar como la CO encargada de la regulación de la velocidad de la bomba aumenta y disminuye respectivamente apuntando a alcanzar el SP.

Figura 78. **Gráfica de control PID de nivel etapa 5**

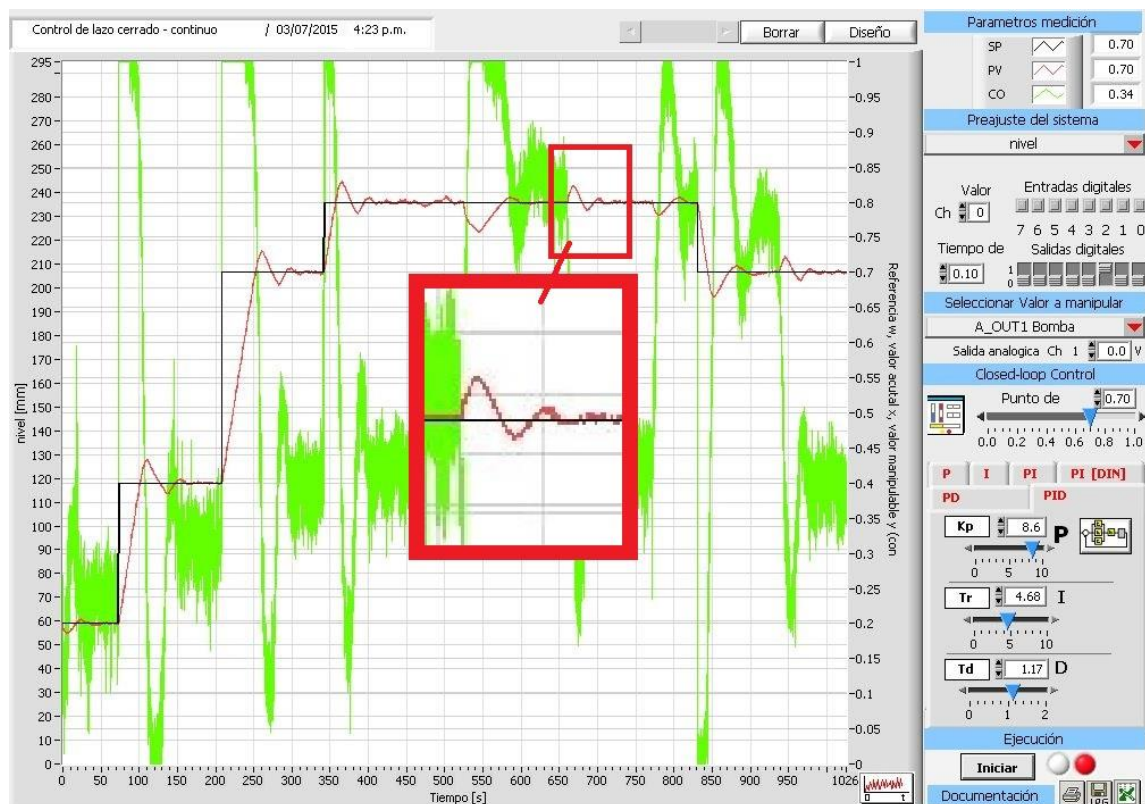


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 78 se puede apreciar un descenso súbito del nivel de agua a pesar que el SP se mantiene estable, esto se dio ya que se introdujo una perturbación al sistema, se activó una salida de agua del tanque para visualizar la reacción del control PID para corregir dicha perturbación externa y si mantenía la característica de corregir la perturbación en tres oscilaciones o menos.

Como se puede apreciar se logra corregir en tan solo dos oscilaciones, dicha perturbación lo que demuestra que el sistema mantiene su característica de regulación sin importar las circunstancias.

Figura 79. Gráfica de control PID de nivel etapa 6



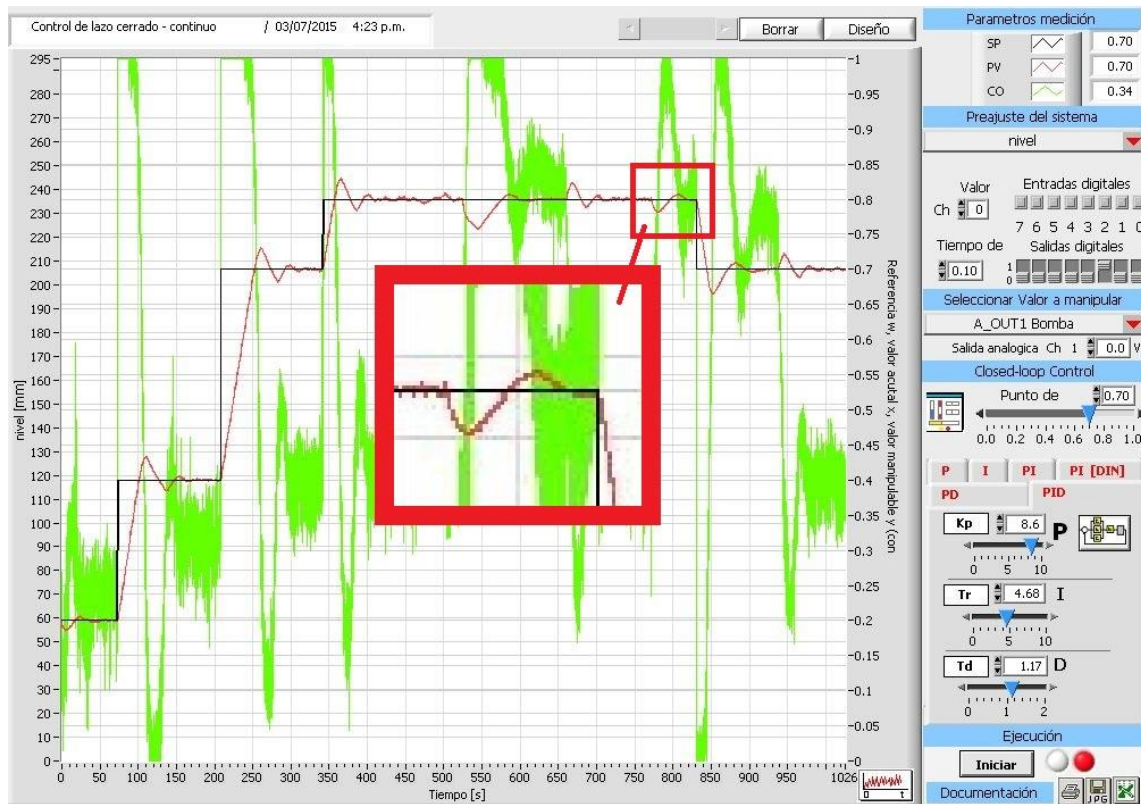
Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 79 se muestra nuevamente un cambio en el nivel del tanque de agua, este cambio es provocado por el cierre parcial de la salida de agua la cual fue abierta en la etapa 5 mostrada en la figura 78, esto para apreciar cómo se corrige el sistema después de un cambio de la perturbación, dado que anteriormente se activó una salida de agua, la bomba centrífuga igualó el caudal de entrada con el caudal de salida de la perturbación, para la etapa 6 se cierra

parcialmente la salida de agua, lo que hace que aumente el nivel de agua ya que ingresaba más agua de la que salía.

Como medida de corrección la CO disminuye para reducir el caudal de agua que ingresa la bomba y poder regular el sistema nuevamente para mantener el SP requerido y esto luego de tres oscilaciones.

Figura 80. **Gráfica de control PID de nivel etapa 7**

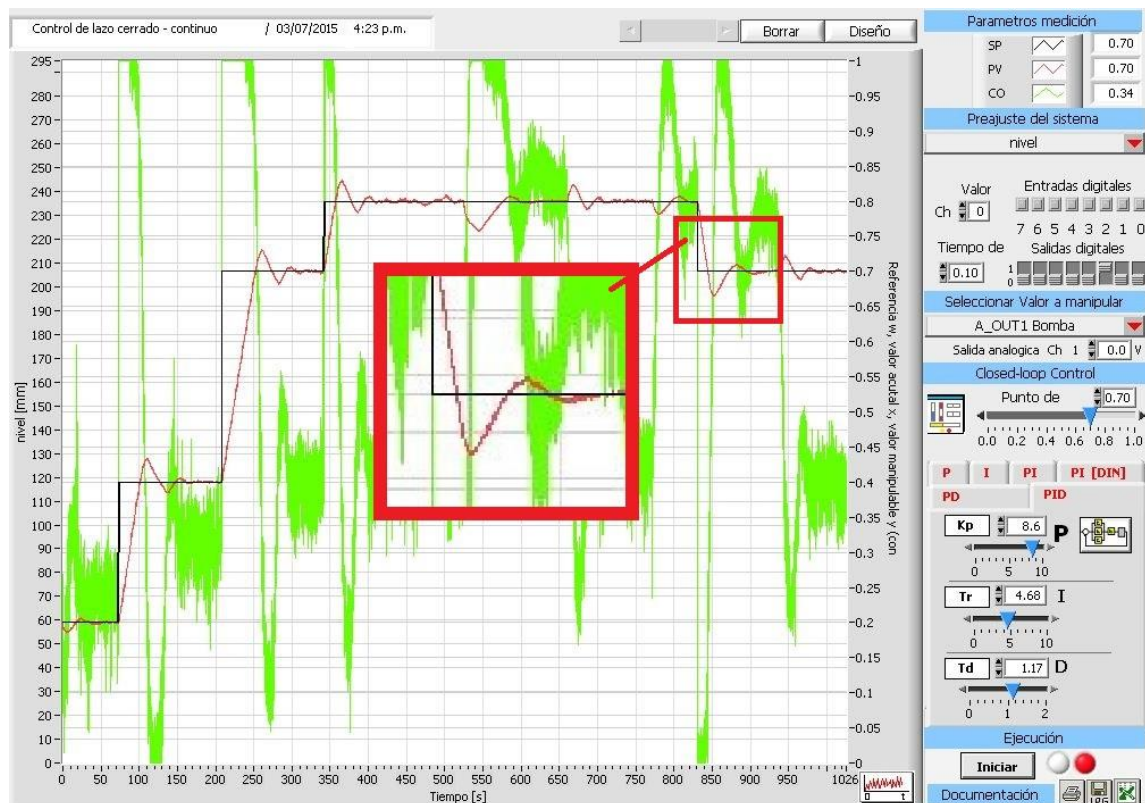


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 80 se realiza una perturbación nuevamente, abriendo la válvula de salida de agua para que después de que el control PID alcance la estabilidad se puede modificar nuevamente el SP pero esta vez para reducirlo de 0,7 a 0,8 y

apreciar el comportamiento y las acciones realizadas con el objetivo de alcanzar el nuevo SP.

Figura 81. Gráfica de control PID de nivel etapa 8



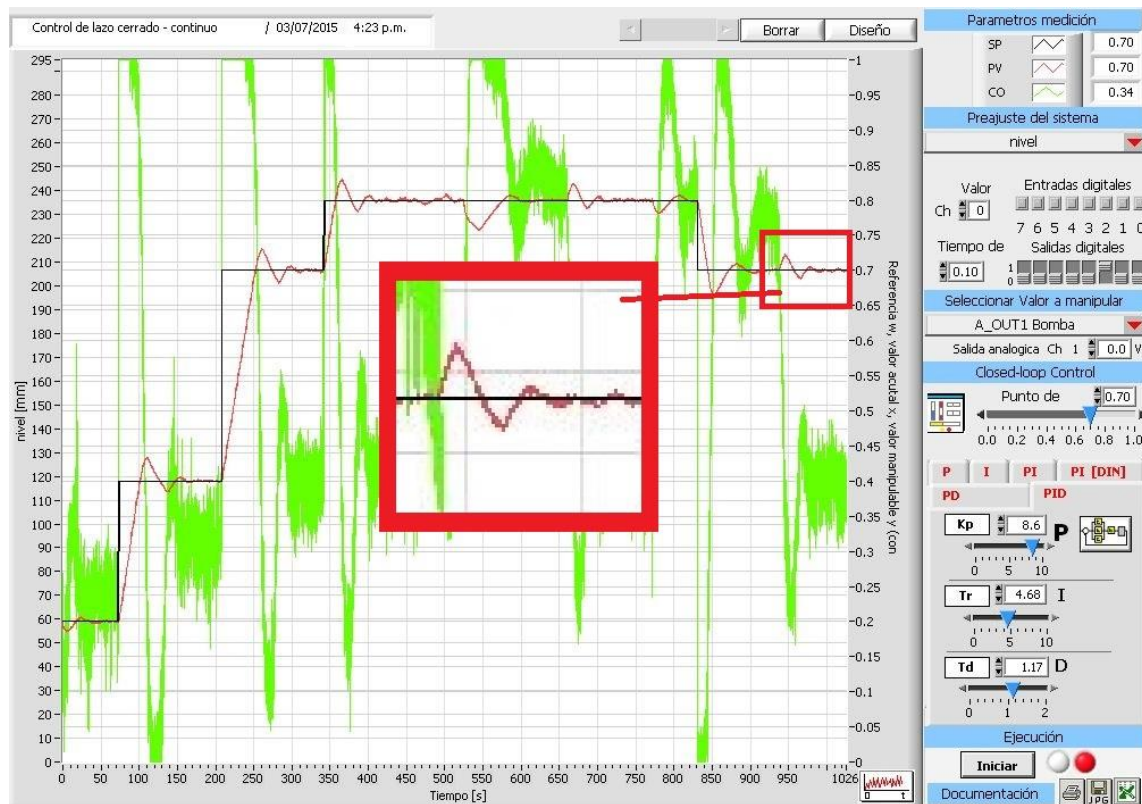
Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 81 se realiza un cambio al SP esta vez se reduce de un 0,8 a un 0,7 para poder apreciar el comportamiento del sistema.

Como se puede observar la CO representada por la gráfica verde, la velocidad de la bomba se reduce casi a cero para alcanzar el SP, recordando la etapa anterior, la salida de agua se cerró parcialmente con lo cual al momento que la bomba deja de trabajar, la salida de agua permite alcanzar rápidamente el

SP y luego de dos oscilaciones el SP es alcanzado manteniendo el nivel de agua a través de igualar el caudal de salida con el caudal de entrada alcanzando una regulación exitosa.

Figura 82. Gráfica de control PID de nivel etapa 9



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 82 se muestra un comportamiento parecido a la figura 79 dado que para este caso se remueve la perturbación del sistema, es decir, se cierra completamente la válvula de salida de agua.

Ya que la bomba iguala el caudal de salida con el de entrada, al eliminar el caudal de salida se empieza a llenar el tanque nuevamente sobrepasando el SP.

Para contrarrestar los efectos producidos por esta acción, el control PID reduce el caudal ingresado y se queda operando a 0,34 que equivale al 34 % de la velocidad de la bomba.

Si ya no hay salida de agua, surge la interrogante, ¿Por qué trabaja la bomba al 34 %? Es porque la bomba ingresa el agua por debajo del tanque para que la superficie del agua mantenga el mínimo movimiento y que el sensor ultrasónico no detecte perturbaciones que provoquen inestabilidad en el sistema.

Por el hecho de ingresar el agua desde abajo del tanque, por efecto de gravedad el agua intenta bajar por la bomba al tanque cisterna, por las leyes de la gravedad se sabe que la fuerza es igual a la masa por la aceleración, al incrementar la masa de agua y además, la gravedad permanece constante, se puede determinar que la fuerza que se genera por la masa de agua es elevada y tiene que ser contrarrestada.

Esa es la razón por la cual la bomba centrífuga se mantiene a un 34 % de su velocidad para contrarrestar la fuerza generada por la masa de agua y así, regular el proceso para mantener el nivel de agua en el SP requerido.

4.2. Implementación de control PID para flujo de agua

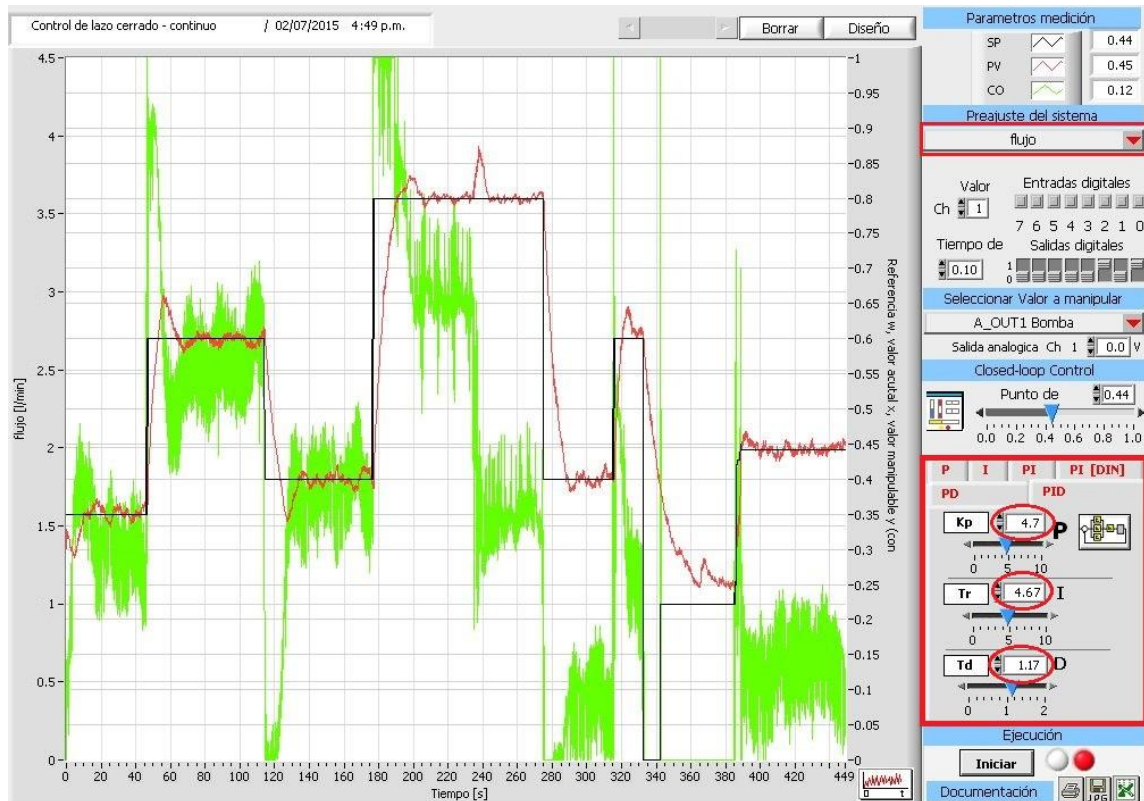
Para la implementación del control PID de flujo se utiliza la opción control de lazo cerrado continuo que fue utilizada previamente para el control de nivel, con la particularidad que se cambia una de las opciones del programa, además de los parámetros PID, en la figura 81 se muestra los cambios necesarios para la implementación del sistema.

En el bloque que dice preajuste del sistema se cambia de nivel a flujo, se sabe que para controlar el flujo es necesario controlar la velocidad de la bomba lo que significa que la bomba centrífuga sigue siendo el actuador a controlar.

Luego de realizados esos cambios se cambian los parámetros PID del bloque de control PID, con la indicación que para la constante proporcional solo se puede utilizar un decimal, para colocar el dato respectivo, si es necesario debe ser aproximado mientras que para las constantes de tiempo integral y derivativo se tienen dos decimales.

Luego de configurar todo el proceso de control para aplicarlo al nivel, se inicia el proceso con sus respectivos cambios de SP para conocer el comportamiento del control PID.

Figura 83. Bloque y cambios para PID de flujo



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

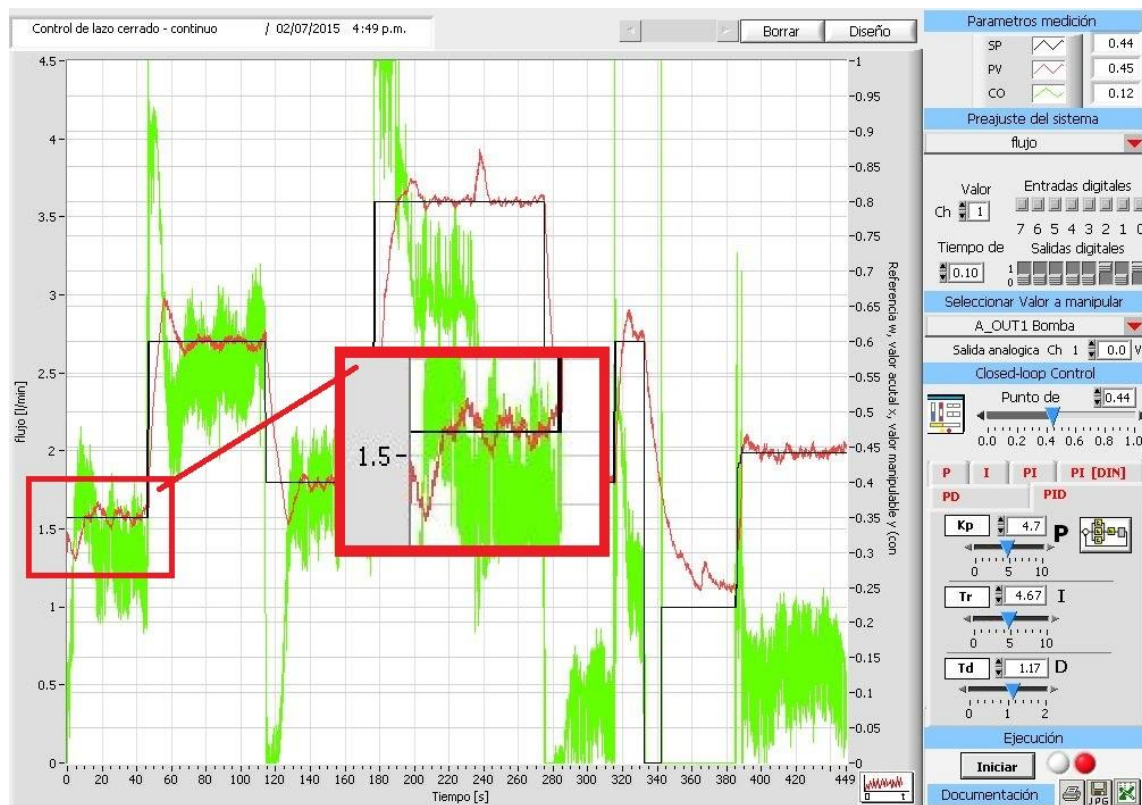
Como se aprecia la figura 83 se implementa el control PID de flujo con los parámetros obtenidos aplicando el método Ziegler y Nichols.

Durante el proceso se notan 9 cambios al SP a modo de observar el comportamiento del sistema, como se regula y estabiliza para alcanzar y mantener los puntos de control requeridos.

A la izquierda se puede observar una regla que determina el flujo medido en litros por minuto l/min, de cero a 4,5 litros por minuto, mientras que en la regla de la derecha se aprecia un rango de 0 a 1 para el SP en puntos por unidad que

representan del 0 al 100 % de la capacidad de flujo que posee la bomba centrífuga.

Figura 84. Gráfica de control PID de flujo etapa 1

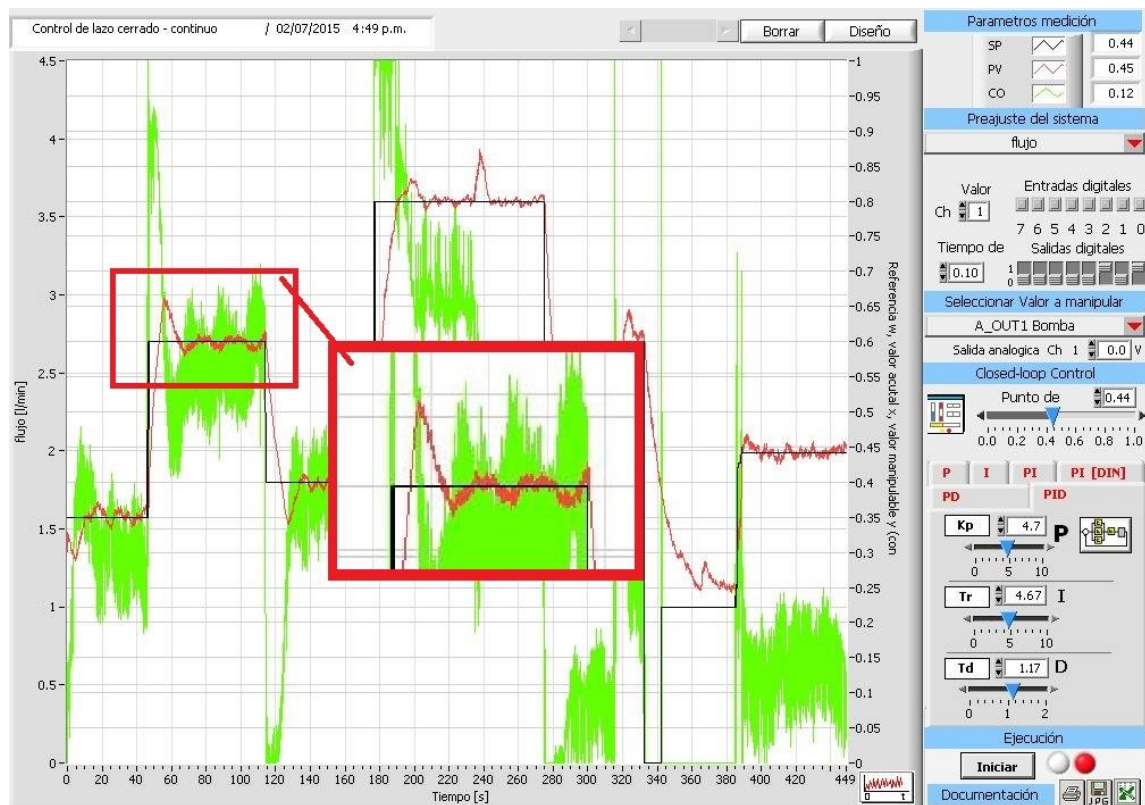


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

Como se aprecia en la figura 84 se arranca con un SP de 0,35 equivalente al 35 % del flujo máximo de la bomba centrífuga, se hace notorio el hecho que la bomba alcanza el SP requerido pero no logra mantener un valor suficientemente cercano al SP como para dejar de oscilar, también se puede apreciar que la CO se mantiene variante durante el tiempo que se mantiene el SP, esta situación puede darse por el ruido producido por el sensor, ya que el

sensor no logra dar un dato más estable sino un dato cambiante, siempre hay un margen de error que el control PID no logra corregir y se mantiene inestable.

Figura 85. **Gráfica de control PID de flujo etapa 2**



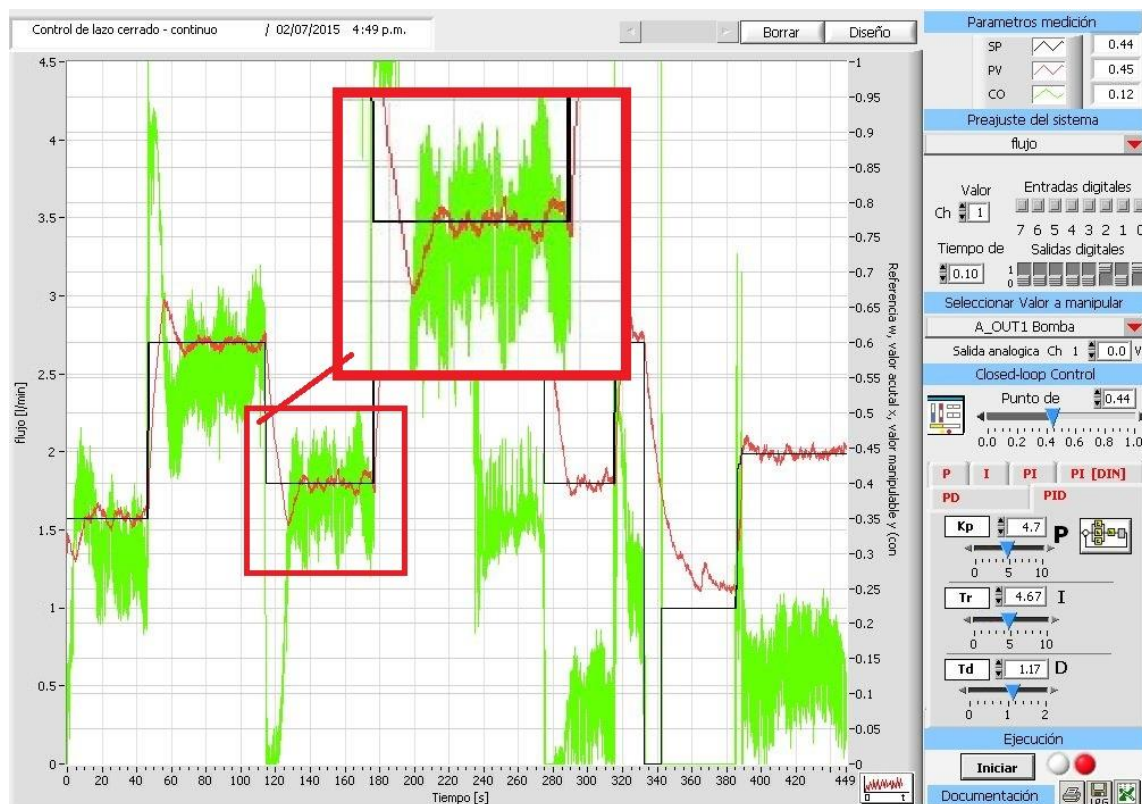
Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 85 se muestra el comportamiento del control PID utilizando un SP de 0,6 que equivale al 60 % del flujo máximo alcanzado por la bomba centrífuga.

Como se puede apreciar, dado el aumento del SP, el lazo de control aumenta la velocidad de la bomba para alcanzar el nuevo requerimiento, sobrepasándolo levemente y regulando la velocidad para mantener el SP

deseado. Según se ve el comportamiento a lo largo de su trayecto el lazo de control mantiene una oscilación y como se indicó en la etapa previa, el mayor aporte a la inestabilidad podría ser generado por la señal variante del sensor de flujo.

Figura 86. **Gráfica de control PID de flujo etapa 3**

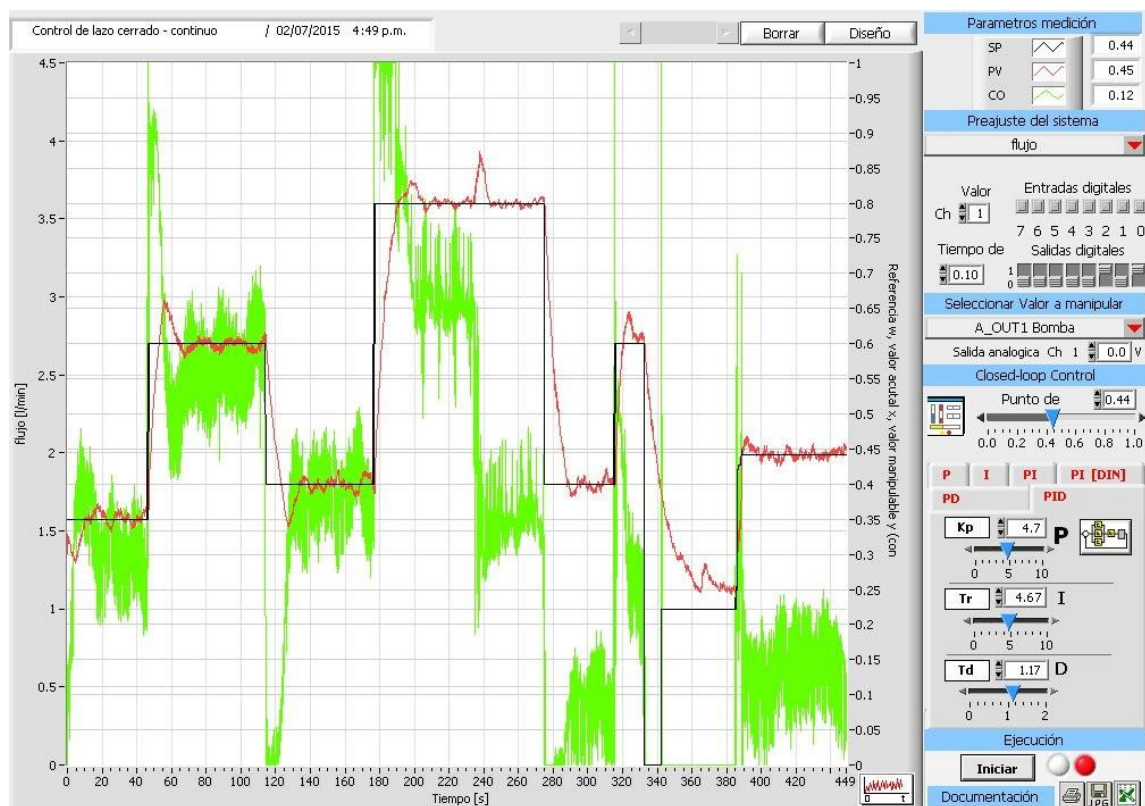


Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 86 se ve el comportamiento del sistema a un cambio, esta vez una reducción del SP, puede notarse que al alcanzar el SP da inicio a las acciones de estabilidad del punto de control y nuevamente mantiene una leve oscilación durante su funcionamiento.

Esto da a conocer el hecho de que debe existir alguna fuente de error o perturbación que no permite el alcance de la estabilidad adecuada, podría ser un problema de sensibilidad del sensor que mide el flujo, también se podría atribuir a una deficiencia de la bomba centrífuga para mantener con mayor precisión el flujo de agua, también podría agregarse el hecho que el sensor tenga un bajo rango de precisión provocado por la calidad o la clase de sensor utilizado y por último, se podría tomar en cuenta el ruido generado por el lazo de control PID.

Figura 87. Gráfica de control PID general



Fuente: elaboración propia, empleando Fluid Lab PA.

En la figura 87 se muestra el comportamiento en general del lazo de control de flujo, donde se puede apreciar que para ningún SP, el sistema logra alcanzar

una estabilidad razonable dada la complejidad del sistema y la sensibilidad del mismo, la entrada del sensor de flujo cuenta con un filtro para evitar fluctuaciones elevadas, haciendo uso de ese filtro en su valor más alto fue que se obtuvo la gráfica presentada en este trabajo de graduación.

Aun con la aplicación de un filtro puede notarse la falta de estabilidad del sistema, lo que da a entender que el sensor genera bastante ruido, el cual perjudica los datos y la regulación del proceso, esto puede ser provocado por el hecho de que se cuenta con un sensor que mide el flujo según un rango de frecuencia.

Entrando más en detalle y citando la información previamente mostrada en el capítulo dos y páginas 58, 59 y 60 del presente trabajo de graduación, se sabe que el sensor de caudal es de tipo molino.

Esto quiere decir que cuenta con aspas transversales a la circulación de flujo y en su extremo un imán permanente que genera un campo magnético medido por un sensor de efecto Hall, quiere decir que al contar con aspas puede ser sensible al flujo tanto de líquidos como gases y el hecho de que existan burbujas en el agua puede variar en mayor o menor medida el flujo detectado por el sensor, además, la vibración generada por la bomba centrífuga puede aportar una mínima cantidad de ruido al sistema.

Luego de ello, a la salida del sensor se cuenta con una placa que transforma la señal del sensor de hercios a voltaje, lo que puede incrementar o al menos trasladar ese ruido al DAQ, lo que provoca variaciones en la medición y por lo tanto no permite que el sistema estabilice adecuadamente.

Otro de los motivos que no permiten el alcance de la estabilidad del sistema podrían ser las constantes PID, sabiendo que dichas constantes se obtuvieron realizando pruebas al sistema, se descarta la posibilidad de que dichas constantes sean el problema pero, existe la posibilidad ya que hay varios tipos de sistemas como el P, I y PI aparte del PID, estos son utilizados según el proceso y para el caso del proceso de flujo se sabe que las variaciones en el flujo siempre se mantienen debido al sensor utilizado.

Relacionado al párrafo anterior, se conoce la constante proporcional, esta es la ganancia que se aplica en el sistema y que no puede ser superada, la constante integral es la acción de corrección de error realizada por el error acumulado, entre más se acumula el error, más incrementa las acciones para corregirlo y entre menos error exista permite también reducir las acciones para no sobrepasar abruptamente el punto de control o SP, se puede decir que la función de la constante integral es amortiguar el lazo de control dándole más estabilidad.

Refiriéndose a la constante derivativa se puede decir que se utiliza para implementar un control de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una reacción significativa antes que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

Añade amortiguamiento al sistema y además, permite alcanzar valores mayores que la ganancia K lo cual provoca una mejora en la precisión del estado estable.

En resumen se dice que la constante derivativa promueve una función previsor y al haber cambios drásticos en el error del proceso la misma provoca acciones drásticas para alcanzar el mínimo error, y esto puede además de dar

estabilidad, generar una inestabilidad ya que reacciona de manera muy brusca ante cualquier cambio.

Tomando en cuenta el comentario previo y añadiendo la constante variación en la medición del sensor, se puede concluir que las pequeñas variaciones y ruidos provocados por el sensor, pueden generar cierta inestabilidad y con la variable derivativa, estas variaciones y ruidos son amplificados y tomados un error que debe ser corregido y en el afán de corregirlo no hace más que empeorar la inestabilidad del sistema.

La constante derivativa puede ser un arma de dos filos y como un extracto de los párrafos previos se expone, que para valores grandes de la constante derivativa se tienen tiempos de reacción reducidos y pequeña reacción ante el error, mientras que para valores pequeños de la constante derivativa se tienen reacciones muy bruscas a pequeños cambios en el error.

¿Qué se puede hacer para mejorar la estabilidad? Para el caso específico que se presenta, se hizo el cálculo de los parámetros del sistema con base en la implementación de un control PID y se estableció el método para implementar el mismo, lo que significa que las variables son correctas, la corrección adecuada sería realizar el análisis y obtener las variables para un control PI, esto porque se sabe que la constante derivativa incrementa los ruidos generados por los sensores.

Otra opción viable podría ser, realizar un cambio en la dimensional de medición y que la misma sea un poco mayor y con un filtro un poco más elevado para evitar las variaciones que provocan inestabilidad.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta es la bomba centrífuga, podría darse el hecho de que la bomba no tenga la precisión ni características de mantener un torque sin importar su velocidad, esto provoca fluctuaciones de fuerza a las distintas velocidades y por lo tanto le aportará inestabilidad al sistema.

Como última opción pero no menos importante, sería cambiar el actuador encargado de variar el flujo, por ejemplo con una válvula proporcional que según el nivel de voltaje proporcionado, dé como resultado un porcentaje de estrangulamiento y a la vez la reducción del caudal.

Con esta estrategia se puede mantener la bomba centrífuga activa al 100 % de su velocidad y así mantener un torque constante y reducir el ruido e imprecisión aportado por la bomba, lo que promovería la estabilidad del sistema y con este cambio también podría ser aplicado un control PI y conocer los resultados a manera de alcanzar un proceso eficiente y preciso.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas de control pueden ser de lazo abierto o cerrado y entre ellos hay una gran variedad.
2. Entre los sistemas de control, el más implementado es el control PID por su elevada precisión.
3. La función de la constante proporcional en un control PID es crear a través de una ganancia, una acción proporcional al error.
4. La función de la constante integral en un control PID es generar señales crecientes y decrecientes, logrando un error cero en estado estacionario.
5. La función de la constante derivativa en un control PID es mejorar la estabilidad del control en lazo cerrado extrapolando el error.
6. La estación de trabajo MPS Compact Workstation presenta grandes características y facilidad para implementar controles PID para diversas necesidades.
7. El Easyport USB es un sistema de adquisición y generación de datos muy práctico y útil en la sintonización de controles PID.
8. La sintonización de los equipos provee información detallada del comportamiento de los mismos.

9. El desarrollo y caracterización de un control PID cuenta con pasos muy detallados desde conocer lo que es un sistema de control, aplicando métodos como Ziegler y Nichols, el cual provee resultados precisos.

RECOMENDACIONES

1. Para todo profesional o estudiante que quiera: Implementar un control PID es importante que considere iniciar por seleccionar los equipos necesarios e integrarlos en un sistema, previo a realizar los cálculos de los parámetros PID, dado que dicho control tiene características muy propias de los equipos y sus imprecisiones para que funcione de manera eficiente.
2. Diseñar un sistema de control e implementar el control PID, es importante que considere la cantidad de sensores y actuadores a utilizar, así como el tipo de señales involucradas en el proceso como corriente, voltaje, frecuencia, entre otros, ya que esto le ayudará a definir el tipo de DAQ que necesita, determinando el número de entradas y salidas que se requerirán.
3. Pretenda diseñar o implementar un sistema de control utilizando la plataforma Fluidlab-PA, debe tomar en cuenta el uso de una licencia ya sea profesional o de estudiante.
4. Aspire diseñar o implementar un sistema de control PID utilizando el EasyPort USB, debe tomar en cuenta que únicamente mide señales de voltaje de 0 a 10 voltios, por lo cual se recomienda que los sensores utilizados tengan salida de voltaje o de no ser posible podrían utilizarse tarjetas convertidores de cualquier señal a voltaje de 0 a 10 voltios.

5. Diseñar o implementar un proceso automático con la estación Compact Workstation, es importante que considere que dicha plataforma está diseñada para mediciones de nivel, flujo, presión y temperatura de agua, para cualquier otro proceso diferente de estos o con un líquido distinto no sería recomendable utilizar dicha plataforma.
6. Hacer uso de la estación Compact Workstation, es importante que considere que el tanque de presión no resiste una presión mayor a 400 mbar.
7. Hacer uso de la estación Compact Workstation, es importante que considere que los tanques y tuberías de la estación son plásticos y no resisten temperaturas mayores a los 70 grados centígrados.
8. Automatizar un proceso e implementar un control, es importante que considere que los controles P, PI, PD y PID se aplican según las necesidades del proceso, lo importante es no elevar los costos innecesariamente, podría haber una opción más viable y económica con otro tipo de control.

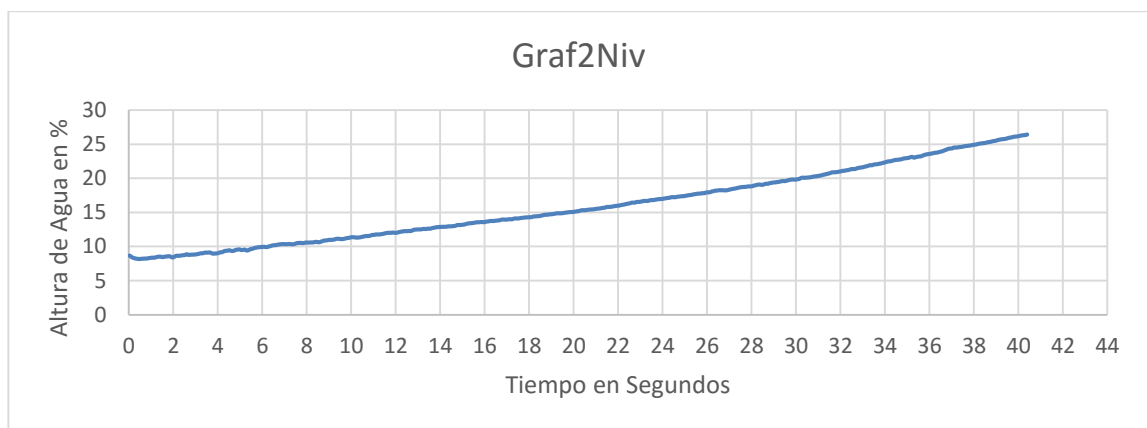
BIBLIOGRAFÍA

1. ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Control PID avanzado*. Madrid: Prentice Hall, 2009. 487 p.
2. EBERHARDT, Löffler. *Manual EasyPort USB Festo*. Denkendorf (Alemania): Festo Didactic, 2008. 338 p.
3. Festo. *Manual Fluid Lab*. Denkendorf (Alemania): Festo Didactic, 2008. 114 p.
4. KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático*. 7a ed. México: Prentice Hall, 1996. 930 p.
5. PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. 4a ed. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 2005. 494 p.

APÉNDICES

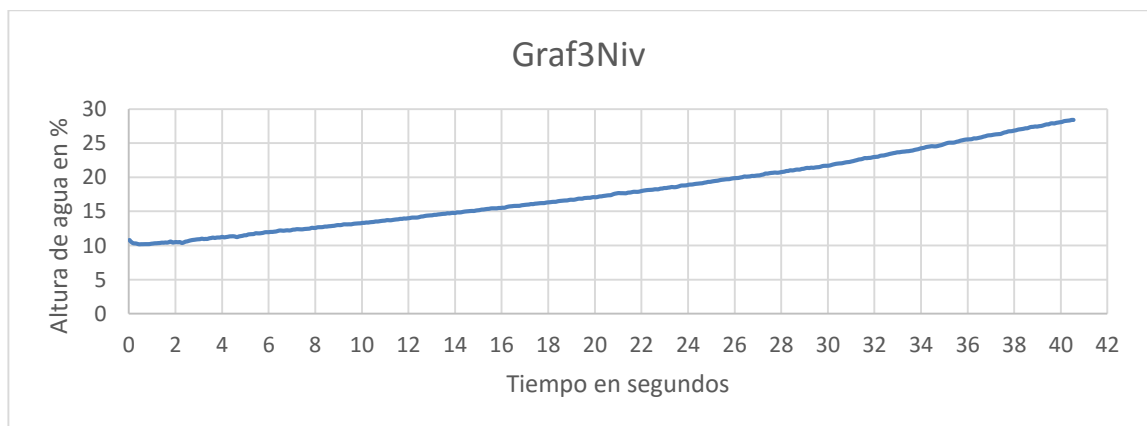
A continuación se muestran los mapeos realizados individualmente para el nivel de agua:

Mapeo de nivel 2



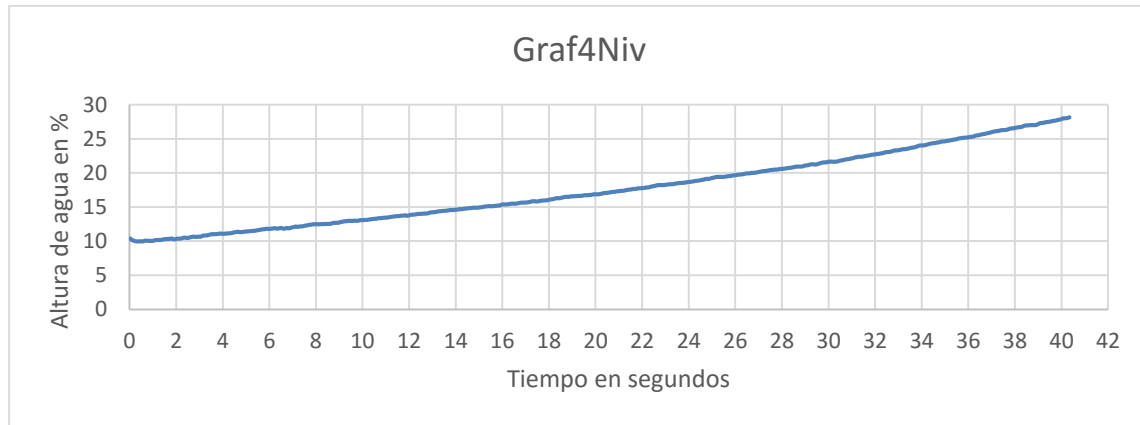
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 3



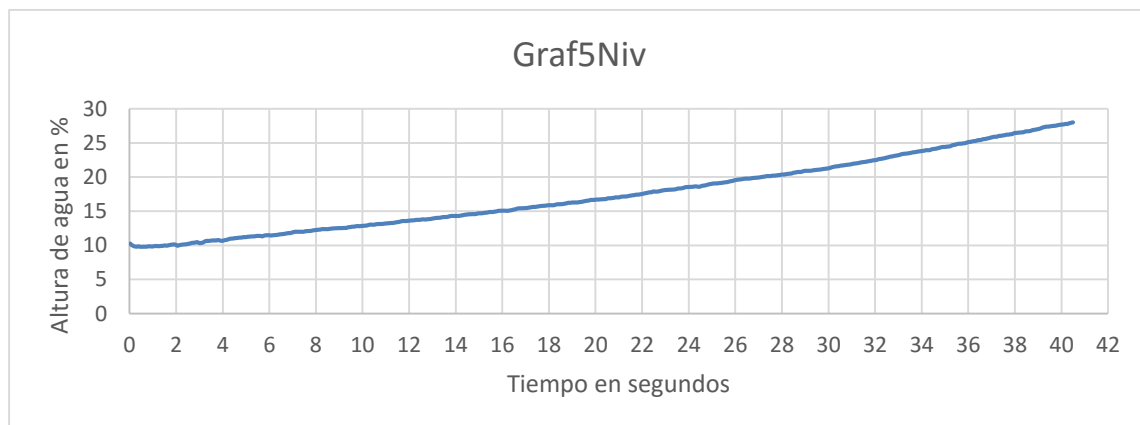
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 4



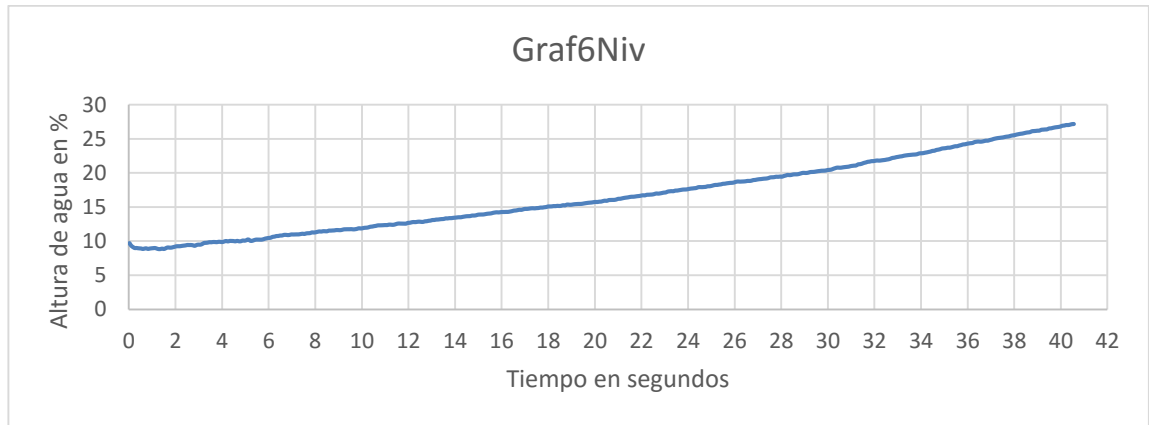
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 5



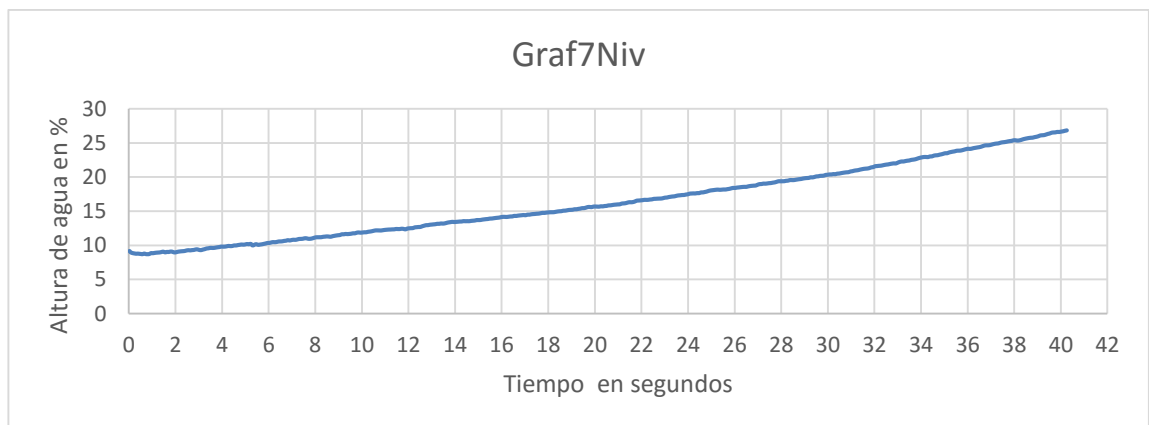
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 6



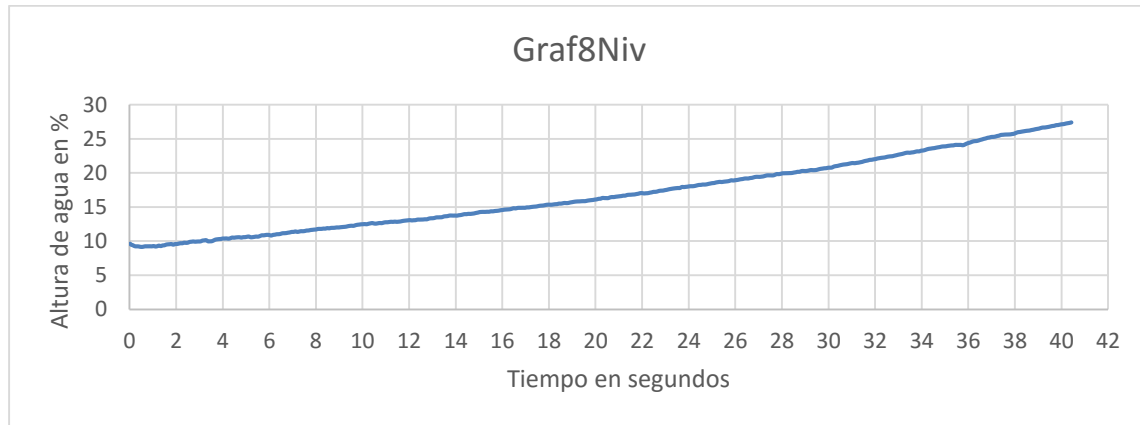
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 7



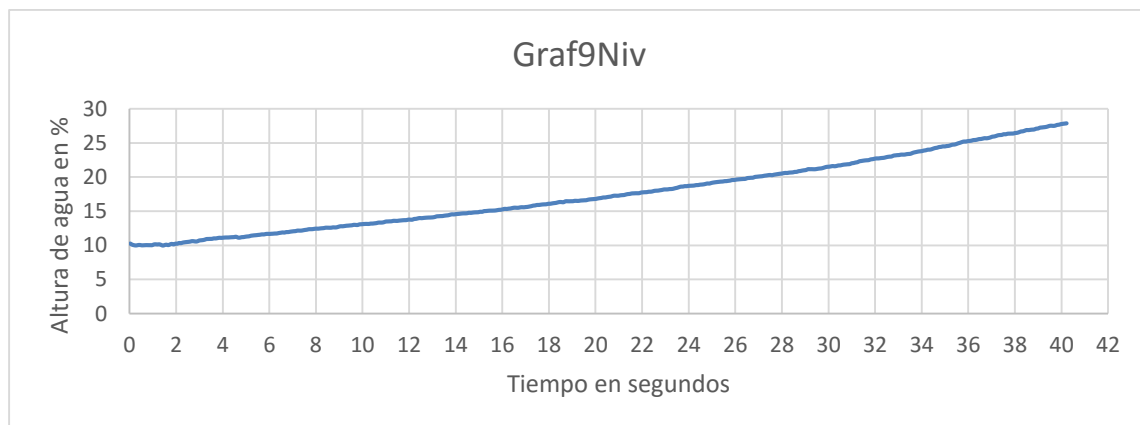
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 8



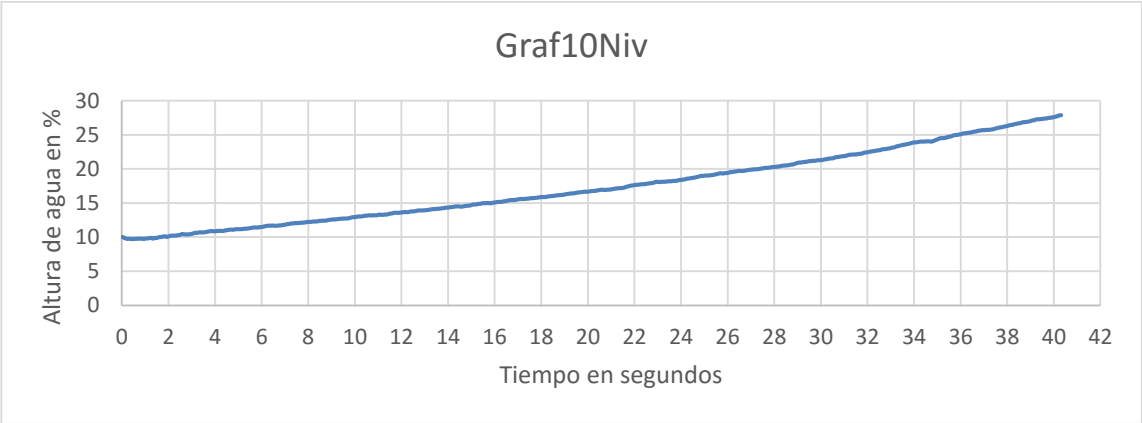
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 9



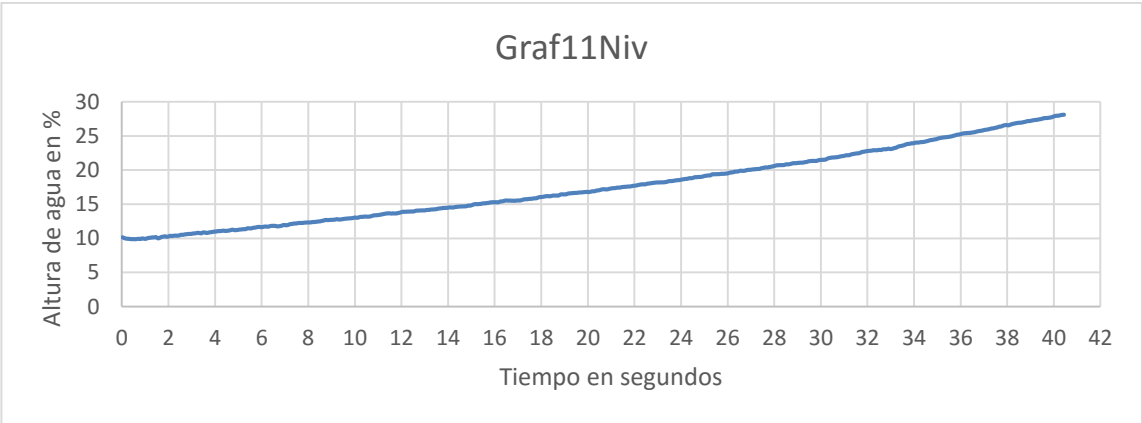
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapecto de nivel 10



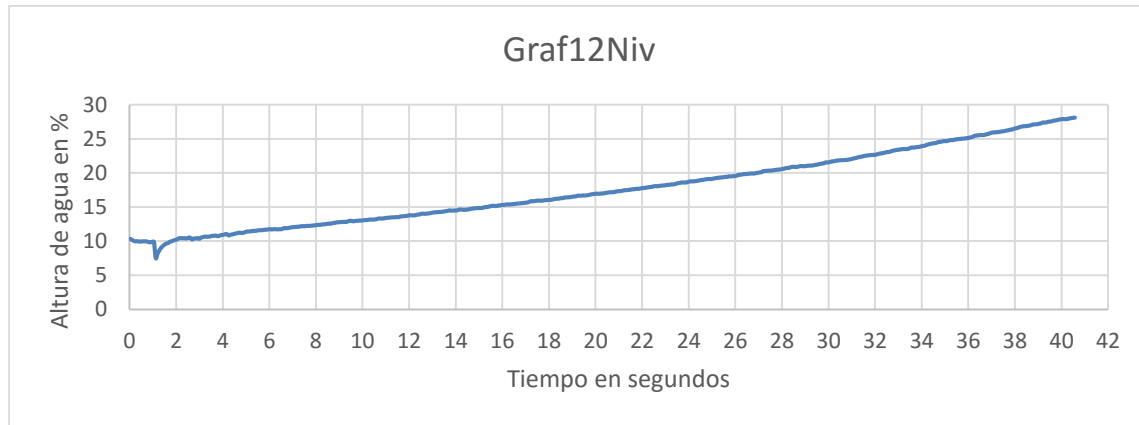
Fuente: elaboraci3n propia, empleando Microsoft Excel.

Mapecto de nivel 11



Fuente: elaboraci3n propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de nivel 12



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A continuación se presentan las tablas de cálculos realizadas en Excel para encontrar las constantes PID:

Cálculos al 55 %

Al 55 %			Cálculos			
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X	Pendiente	Kp
A 134	A 253	Apox. A 194	14,1686903	14,2188182	0,38380935	6,68066729
10,3373636	19,985	15,1611818	14,9159322	16,1657273		
Valor aprox.		15,1917273				

Al 55 %			Puntos en X & Y	
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X
A 134	A 253	Apox. A194	14,1686903	14,2188182
10,3373636	19,985	15,1611818	14,9159322	16,1657273

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Cálculos al 65 %

Al 65 %			Calculos			
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X	Pendiente	Kp
A 257	A 375	Apox. A 316	18,2986133	24,1387273	0,48564097	10,5596632
20,3103636	29,9328182	25,1215909	19,2889676	26,178		
Valor aprox.		25,1176364				

Al 65 %			Puntos en X & Y	
Inicio	Fin	Centro	Puntos Y	Puntos X
A 257	A 375	Apox. A 316	18,2986133	24,1387273
20,3103636	29,9328182	25,1215909	19,2889676	26,178

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

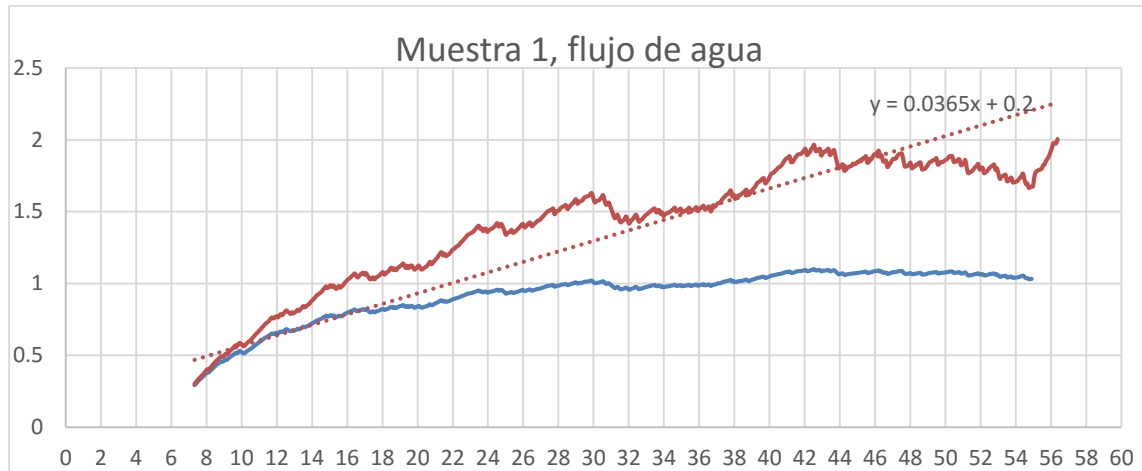
Resultados

Prom Kp	Ti	Td
8,62016526	4,68	1,17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

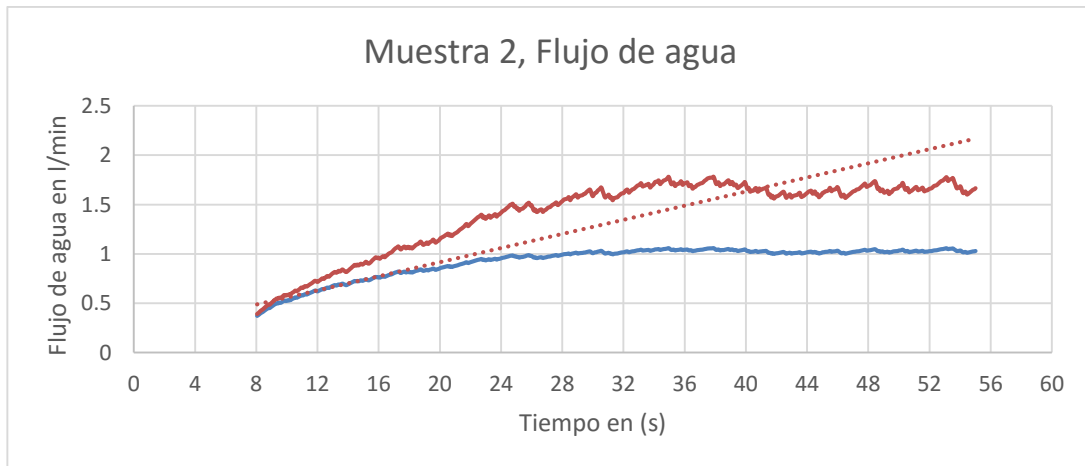
A continuación se presentan los resultados de los múltiples mapeos tomados del proceso de flujo:

Mapeo de flujo 1



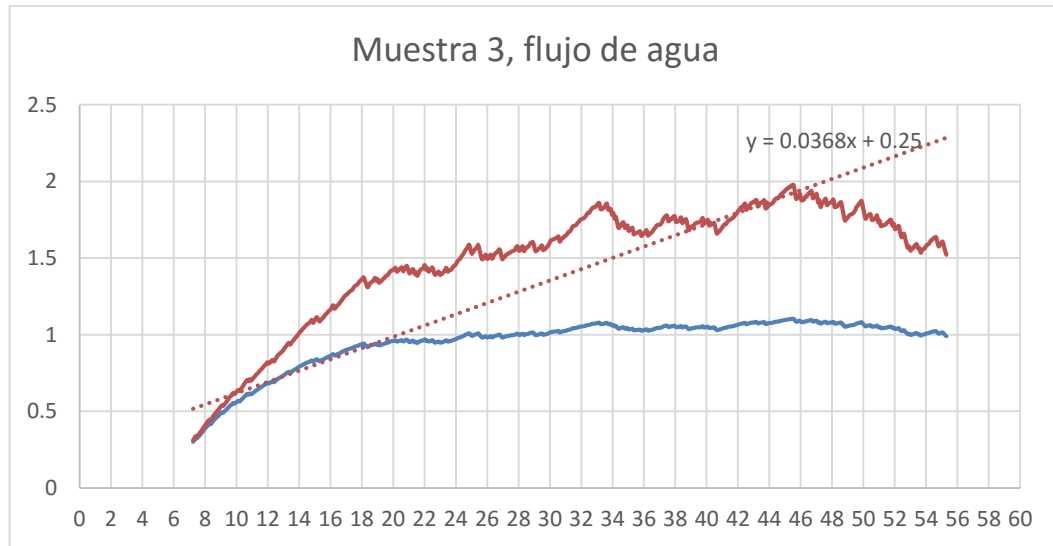
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 2



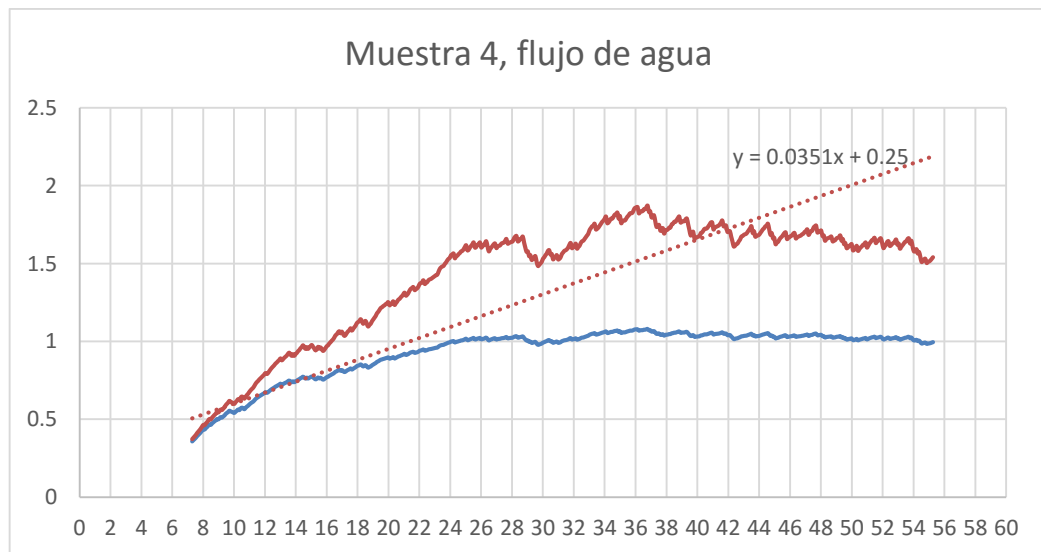
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 3



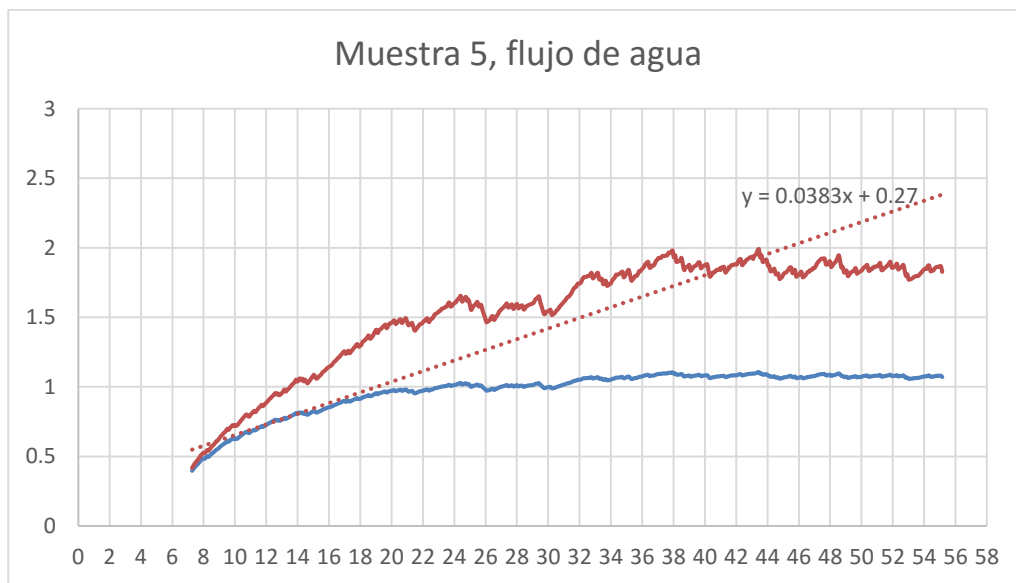
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 4



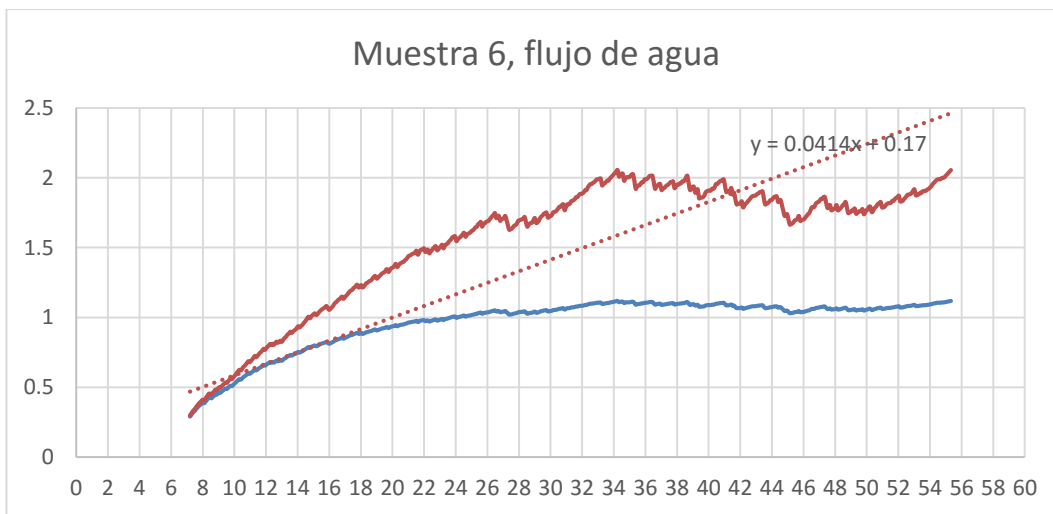
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 5



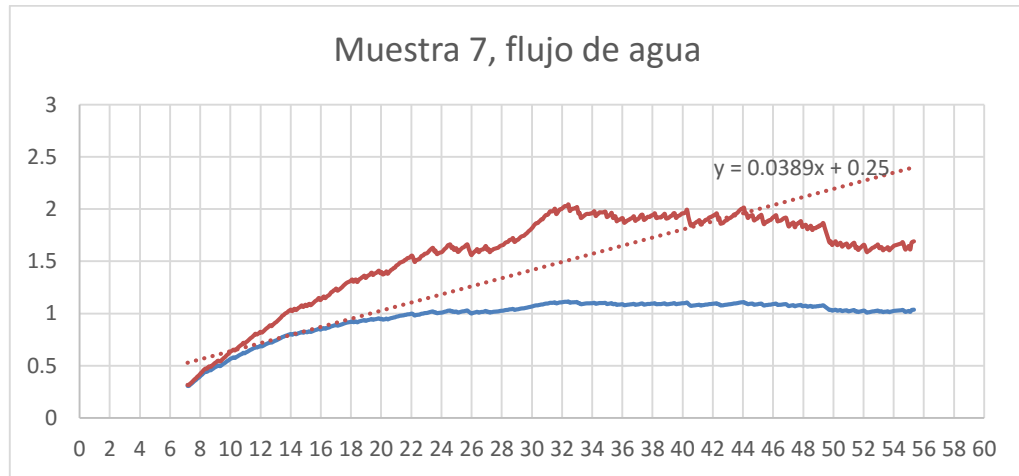
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 6



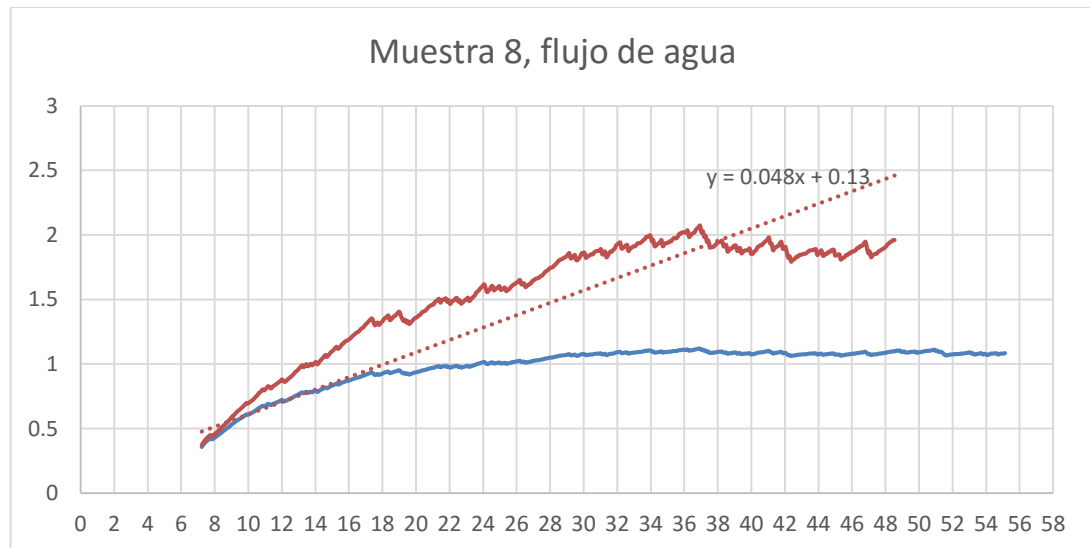
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 7



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Mapeo de flujo 8



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las tablas a continuación muestran algunos cálculos realizados en Excel de las gráficas elaboradas:

Trazado del sensor de flujo

Sensor flujo					Rango l/min	Rango Vcd
0,3	9	8,7	133,333333	666,666667	5	6,66666667
40	1200	1160		40	0,3	0,4

Pendientes al 60 y 80 %

	pendiente m al 60 %			Pendiente m al 80 %	
8,318625	4,671125	3,6152961	1,727875	5,267625	1,57091668
23,58	16,89	2,83475334	3,31	8,28	1,91347754

Resultados al 60 y 80 %

Kp 60 %	2,84597579	3,62429156
Kp 80 %	6,54393159	5,36926742
Kp prom.	4,69495369	4,49677949

A continuación se presentan los datos técnicos del sensor ultrasónico utilizado en el proceso de control de nivel.



Ultrasonic proximity switch

3RG6115-3BF00-PF	Compact range M30 K3, 4...20 mA, normally open Kompaktreihe M30 K3, 4...20 mA, Schließer	Connector M12 Stecker M12
3RG6115-3BE00-PF	Compact range M30 K3, 4...20 mA, normally closed Kompaktreihe M30 K3, 4...20 mA, Öffner	Connector M12 Stecker M12

Size/Bauform	:	cylindrical M30/zyllindrisch M30
Function/Funktion	:	Diffuse/Taster

Operating distance/Schaltabstand

Sensing range/Erfassungsbereich	:	400 ... 3000 mm
Focusing range/Einstellbereich	:	400... 3000 mm
Adjustment/Einstellung	:	Potentiometer / SONPROG
Standard target/Normmessplatte	:	50 x 50 mm
Repeat accuracy/Wiederholgenauigkeit	R :	+/- 5 mm
Switching hysteresis/Hysteresis	H :	20 mm
Rated ultrasonic frequency/ Ultraschallnennfrequenz	:	120 kHz

Analog output/Analogausgang

Output current/Ausgangsstrom	:	4 ... 20 mA
Working resistance/Bürde	:	0 ... 300 Ohm
Characteristic/Kennlinie	:	Rising/steigend
Resolution/Auflösung	:	12 Bit (4095 steps/Schritte)
Measuring rate/Melßrate	:	50 ms (20 Hz)
Accuracy/Genauigkeit	:	+/- 1,5 %

Power supply voltage/ Versorgungsspannung

Rated operational voltage/ Bemessungsbetriebsspannung	Ue :	24 V DC
Operating voltage range/ Betriebsspannungsbereich	UB :	12 ... 30 V DC incl. ripple content / 12 ... 30 V DC incl. Restwelligkeit
by reduction of operating voltage/ bei Betriebsspannungsreduzierung	:	12 V < operating voltage < 20 V 12 V < Betriebsspannung < 20 V
Detection/Erfassung	:	20 % < reduced sensitivity < 0 % 20 % < reduzierte Empfindlichkeit < 0 %
No-load supply current/Leerlaufstrom	Io :	max. 50 mA
max. ripple content/zul. Restwelligkeit	:	10 %

Output/Ausgang

Output/Ausgangsart	:	pnp
Rated operational current/ Bemessungsbetriebsstrom	Ie :	max. 300 mA
Output voltage drop/Spannungsfall max.	Ud :	max. 3V (300mA)
Off-state current/Reststrom	Ir :	max. 0,01 mA
Short circuit strength/Kurzschlußfestigkeit	:	built-in/eingebaut
Overload withstand capability/ Überlastfestigkeit	:	built-in/eingebaut

Subject to modifications without notice

Pepperl+Fuchs Group
www.pepperl-fuchs.com

USA: +1 330 486 0001
fa-info@us.pepperl-fuchs.com

Release: 09.09.2010

Germany: +49 621 776-4441
fa-info@pepperl-fuchs.com

Copyright Pepperl+Fuchs

Singapore: +65 6779 9301
fa-info@sg.pepperl-fuchs.com

PEPPERL+FUCHS
SENSING YOUR NEEDS

1

Ultrasonic proximity switch

Bidirectional connection „Release“/ **Bidirektionaler Anschluß „Freigabe“**

As release input/als Freigabeingang

max. input voltage/ max. Eingangsspannung	:	30 V
max. L-Level (SONAR-BERO inactive)/ max. L-Pegel (SONAR-BERO inaktiv)	:	0 ... 3 V
min. H-Level (SONAR-BERO active)/ min. H-Pegel (SONAR-BERO aktiv)	:	15 ... 30 V or high-resistance/oder hochohmig
Input resistance (current sink)/ Eingangswiderstand (Stromsenke)	:	0,9 kOhm
min. enable time/min. Freigabezeit	:	150 ms

As synchronization connection/ als Synchronisierschluß

max. quantity of SONAR-BERO run in synchronism/ max. Anzahl der synchron laufenden SONAR-BERO	:	10
--	---	----

Times/Zeiten

Frequency of operating cycles/ Schaltfrequenz	f	:	2 Hz
Time delay before availability/ Bereitschaftsverzug	tv	:	280 ms
Response time/Ansprechzeit	:	:	200 ms

Temperatures/Temperaturen

Rated temperature/ Bemessungstemperatur	Tu	:	25 Cel
Ambient temperature/ zul. Umgebungstemperatur	Ta	:	-25 ... +70 Cel
Storage temperature range/ zul. Lagertemperatur	Ts	:	-40 ... +85 Cel
Thermal drift (teach value)/ Temperaturdrift (Toleranzwert)			max. $\pm 1,5$ %

Electrical protections/

Elektrische Schutzmaßnahmen, EMV

Reverse voltage protection/ Verpolungsschutz	:	built-in/eingebaut
Wire breakage protection/ Drahtbruchsicherheit	:	built-in/eingebaut
Inductive overvoltage/Induktionsschutz	:	built-in/eingebaut
False pulses/Einschaltfehlimpuls	:	suppressed/unterdrückt
IEC 61000-4-2		4 kV
IEC 61000-4-3		10 V/m
IEC 61000-4-4		2 kV
IEC 61000-4-6		10 V/m
EN 55011		Class B



Ultrasonic proximity switch

Mechanical protections/ Mechanische Schutzmaßnahmen

Degree of protection/Schutzart	:	IP 65
Shock/Schockbeanspruchung	:	30 g; 11 ms duration/Einwirkdauer
Vibration/Schwingbeanspruchung	:	10 bis 55 Hz, 1 mm amplitude/Amplitude
Max. tightening torque/ max. Anzugsdrehmoment	:	60 Nm

Indicators/Anzeigen

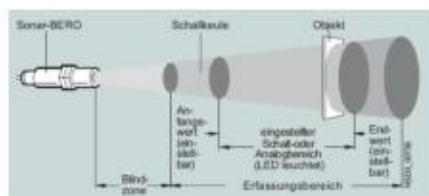
:	LED (yellow)/LED (gelb):
Switching status: On:	LED shines/ Schaltzustand: Ein: LED leuchtet
Misadjustment:	LED flashes/ Fehleinstellung: LED blinkt

Mounting conditions/ Einbaubedingungen

Mounting position/Einbaulage	:	any/beliebig
Max. cable length/ max. zulässige Leitungslänge	:	300 m

Constructive characteristics/ Konstruktive Merkmale

Housing material/Gehäuse	:	brass nickel-plated/Messing vernickelt
Connection/Anschluß	:	Connector M12, 5-pole/Stecker M12, 5-polig
Direction of radiation / Abstrahlrichtung	:	front side/stirnseitig
Weight/Gewicht	:	0,34 kg



3RG6115-3BE00-PF:

