

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Comparación de controlador Difuso vs. Clásico aplicadas a
FESTO WorkStation**

**Guillermo Alejandro Duque Carvajal
Nuria Mabel Chamorro Lara**

Electrónica y Automatización

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero en Electrónica

Quito, 11 de Octubre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Comparación de controlador Difuso vs. Clásico aplicadas a FESTO WorkStation

Guillermo Duque y Mabel Chamorro

Nombre del profesor Tutor: Óscar Camacho, Ph.D.

Quito, 11 de Octubre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Guillermo Alejandro Duque Carvajal

Código: 00202122

C.I.: 1720947116

Fecha: Quito, 11 de Octubre de 2023

Nombres y apellidos: Nuria Mabel Chamorro Lara

Código: 00204417

C.I.: 1750893461

Fecha: Quito, 11 de Octubre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>

RESUMEN

Se realizó un estudio utilizando la máquina Festo MPS/PA, donde se comparó el controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) con el controlado PD Difuso + I (Proporcional - Derivativo Difuso + Integral) Se planteó la idea de que el controlado PID a pesar de ser el más sencillo y utilizado a nivel industrial, no siempre es el más eficiente, comparando con un controlador difuso, observaremos las ventajas y desventajas de cada uno utilizando la máquina Festo MPS/PA, el programa LabView para realizar el control desde la computadora, EasyPort el canal de comunicación entre la máquina y la computadora y MatLab utilizado para los cálculos y modelo. Se utilizaron dos variables, presión y flujo, para el estudio ya que se buscó ser exactos. Palabras clave: Festo, difuso, LabView, Matlab, Dahlin, EasyPort

ABSTRACT

A study was conducted using the Festo MPS/PA machine, where a comparison was made between the PID controller (Proportional-Integral-Derivative) and the Fuzzy PD+I controller (Proportional-Fuzzy Derivative+Integral). The idea was raised that, despite being the simplest and widely used in industrial settings, the PID controller is not always the most efficient. By comparing it with a fuzzy controller, we will observe the advantages and disadvantages of each one using the Festo MPS/PA machine, the LabView program for computer-based control, EasyPort as the communication channel between the machine and the computer, and MatLab used for calculations and modeling. Two variables, pressure and flow, were used for the study, aiming for precision.

Keywords: Festo, fuzzy, LabView, Matlab, Dahlin, EasyPort.

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	12
2	Fundamentos	19
2.1	Control Clásico PID	19
2.2	Controlador PD Difuso + I	20
2.3	Ganancia Proporcional (K_c)	21
2.4	Tiempo Integral (T_i)	23
2.5	Tiempo Derivativo (T_d)	24
2.5.1	Constante de tiempo del controlador (τ_c)	25
2.6	Función de Membresía	26
3	Modelado del Sistema	28
3.1	Selección de Variables de Control	28
3.1.1	Flujo	28
3.1.2	Presión	28
3.2	Sintonización de las variables	28
3.2.1	Método de Dahlin	28
3.2.2	Método de Stark	29
3.2.3	Comando Matlab: System Identification	30
4	Proceso	33
4.1	Recopilación de Datos de Referencia	33
4.2	Sintonización y Evaluación de Controladores	33
4.3	Control de Variables por separado	33
4.4	Implementación de Controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	33
4.5	Implementación de Controlador PD Difuso + I (Proporcional-Derivativo + Integral)	34
4.6	Implementación del Controlador en LabView	34

	8
5 Implementación	36
5.1 Ejecución	36
6 Índices de desempeño	39
7 Resultados y conclusiones	40
Bibliografía	41

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Máquina MPS/PA	14
1.2	Refrigerante Automotriz	15
1.3	Bomba centrífuga P101	15
1.4	Bomba P101 con sensor de flujo B102	16
1.5	Diagrama de flujo del sistema de control de flujo de circuito cerrado	16
1.6	Válvula V107	17
1.7	Tubería transparente y cilindro metálico	17
1.8	Manómetro	18
1.9	Diagrama de flujo del sistema de control de presión de circuito cerrado	18
2.1	Esquema del controlador PD Difuso + I	21
2.2	Función de Membresía	26
2.3	Reglas de control Difuso (Ponce, 2010)	27
3.1	Estimación de Curva de reacción de Flujo	30
3.2	Estimación de Curva de reacción de Flujo	32
4.1	Programación LabView	34
4.2	Diseño en LabView de controlador PID y PD Difuso + I de Presión y Flujo	35
5.1	PID Clásico vs. PD Difuso + I para Flujo con cambio de referencia	37
5.2	PID Clásico vs. PD Difuso + I para Flujo con perturbaciones	38
5.3	PID Clásico vs. PD Difuso + I para Presión con cambio de referencia	38
5.4	PID Clásico vs. PD Difuso + I para Presión con perturbaciones	38

DEDICATORIA

En especial memoria a mi abuelito Guillermo Antonio, y a mis padres; ,con todo mi amor y cariño, gracias por su apoyo son mi mayor admiración.

Guillermo Duque

Con todo mi cariño y amor para mi padre Robert, mi madre Nuria, mi esposo Andrés, mi hija Victoria y mis hermanos Robert y Pamela; gracias por siempre ser mi apoyo y mi inspiración.

Mabel Chamorro

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento en primer lugar a nuestras familias, quienes nos han acompañado en todo este trayecto y han sido parte fundamental para conseguir todas nuestras metas y sueños. A la Universidad San Francisco y a nuestro tutor de tesis Oscar Camacho, que nos ha sabido guiar de la mejor manera para poder culminar de forma exitosa este hito dentro de nuestra vida estudiantil, preparándonos para ser buenos profesionales y aportar a la sociedad con nuestros conocimientos y valores. Un especial agradecimiento a nuestro profesor y amigo Marco Herrera, por su ayuda a lo largo de este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El control industrial se basa en la aplicación de sistemas de control utilizados para la mejora y eficiencia de procesos, permitiendo que estos puedan operar de manera automática, reduciendo la intervención humana y a la vez minimizando los costos de operación. El control automático de procesos nació por la necesidad de generar productos más uniformes, de más alta calidad, con una mayor exactitud, mejores niveles de seguridad y optimización de recursos; lo cual implica, por lo general, mayores beneficios (Camacho, Rosales Rivas, 2020). En algunos procesos industriales como envasado de líquidos o embotellado, se trabaja con cuatro variables importantes que son: temperatura, flujo, presión y nivel o caudal, para poder mejorar los procesos se necesitan de los controladores y el más utilizado a nivel industrial es el PID el cuál se maneja por tres parámetros, proporcional, integral y derivativo. El controlador PID es utilizado en varios sistemas donde necesitan una alta precisión, como en el control de nivel en tanques de almacenamiento de petróleo, sin embargo, a pesar de ser el más utilizado no siempre es la mejor opción.

El control difuso o control borroso, se utiliza en una variedad de industrias y aplicaciones para manejar sistemas que son complejos, imprecisos o difíciles de modelar con precisión mediante métodos tradicionales de control (Kassir, 2015). Básicamente la Lógica Difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento (Camacho, Rosales Rivas, 2020). Es utilizado en la industria automotriz en el control de la transmisión automática, en el control de la dirección asistida, en sistemas de frenado antibloqueo (ABS) y control de la climatización del automóvil, de igual forma para el control de pH en Procesos Químicos. La presente investigación postula la hipótesis de que un control PI difuso tiene ventajas ante un control PI clásico. Para comprobar dicha hipótesis se trabajó en el equipo MPS/PA manufacturada por la empresa

alemana FESTO. Dentro de la cual, se pueden explorar múltiples variables, de las cuales, el trabajo se enfocará sólo en la variable de presión y flujo. De igual manera, se llevó a cabo una investigación para analizar el comportamiento de la máquina Festo MPS/PA al variar la capacidad del actuador (bomba de agua) desde 0 hasta el 100 % de su capacidad. Los valores de referencia y medidos durante el estudio se expresaron en voltios, y se realizaron conversiones a unidades de presión (PSI) y flujo (l/min) para una comprensión más clara de los resultados.

La máquina FESTO MPS/PA se observa en la figura 1.1, es una estación de trabajo modular que permite replicar en laboratorio la operación y control de las variables más comunes en los procesos industriales con líquidos que son flujo, nivel, presión y temperatura. El control de un sistema cerrado permite incrementar la eficiencia y la seguridad en los procesos. Usando esta estación de trabajo es posible adquirir los conceptos fundamentales de un proceso industrial cerrado y realizar pruebas de control del proceso. La estación de trabajo tiene cuatro sistemas de control que pueden ser operados de forma independiente, permite trabajar en el procesamiento de señal analógica y la sintonización de bucles.

El software LabView permite controlar, monitorear y adquirir los datos del proceso (Kodosky, 2020). La comunicación se realizó a través de EasyPort, que es la interfase que permite el comunicar los diferentes sensores y enviar la señal del sistema desde y hacia el software. Se dispone de diferentes sensores para medir las variables. El sensor para medir flujo tiene una turbina, la velocidad del rotor es proporcional al caudal y se detecta sin contacto a través de un sistema optoelectrónico (infrarrojo) que tiene incorporado. La bomba centrífuga P101 permite circular el agua desde el tanque principal a través del sistema de tuberías, e incrementar el flujo y la presión en el sistema. El sensor de presión mide la presión dentro de las tuberías y dentro del tanque de presión.



Figura 1.1: Máquina MPS/PA

La máquina FESTO otorga un manual de usuario (Helmich, 2008), en el cual se detalla la operación de sus diferentes componentes. Dentro de este manual se encuentra detallado los diagramas que los usuarios deben utilizar para censar, monitorear y ver el comportamiento de las diferentes variables. En el caso del flujo, este se compone de el tanque, se observa en la figura 1.2, en donde se almacena el líquido (refrigerante automotriz), el actuador, el sensor y la válvula V104 que debe estar abierta para que el líquido realice un circuito cerrado entre estos 3 componentes.



Figura 1.2: Refrigerante Automotriz

El actuador es el un motor que permite bombear el líquido en cuestión. La bomba suministra fluido desde un tanque de reserva B101 a través del sistema de tuberías (Helmich, 2008).

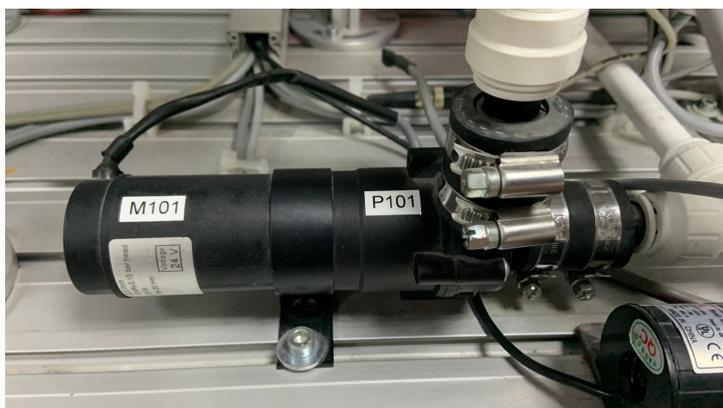


Figura 1.3: Bomba centrífuga P101

La bomba suministra un fluido desde el depósito a través de un sistema de tuberías. El caudal se detecta en forma de valor real mediante un sensor de molinete optoelectrónico B102 (2) (Helmich, 2008). Si se producen perturbaciones o cambios en el punto de ajuste, el valor real se debe mantener en un flujo determinado.



Figura 1.4: Bomba P101 con sensor de flujo B102

Para controlar el sistema se puede utilizar un elemento continuo, en la figura 1.4 observaremos el diagrama de flujo del sistema de control de flujo de circuito cerrado

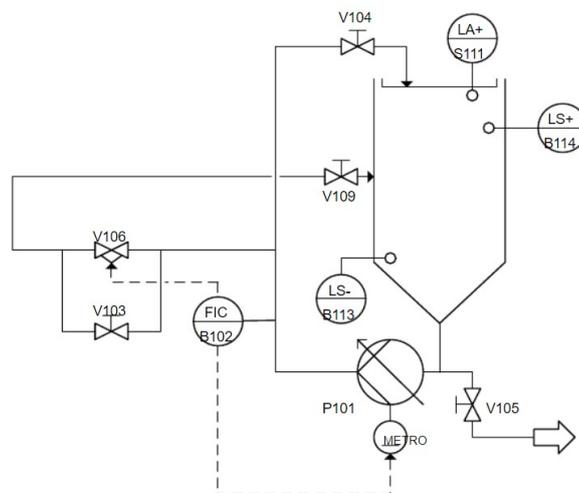


Figura 1.5: Diagrama de flujo del sistema de control de flujo de circuito cerrado

En el caso de la presión, requiere que la válvula V107, figura 1.5, se encuentre normalmente cerrada, lo cual implica que el circuito no llega a retroalimentarse tal como lo haría en el caso del flujo. En vez de esto, se debe encender el motor que bombea el líquido, nos aseguramos que líquido llegue hasta la mitad de un segmento de tubería transparente el cual se encuentra junto a un envase cilíndrico metálico. Cerramos la válvula V107 haciendo que el sistema se presurice y tomamos datos.



Figura 1.6: Válvula V107

A través de un sistema de tuberías, la bomba P101 suministra un fluido desde un depósito a un tanque de presión precargado con gas B103 como se observa en la figura 1.6. La presión se detecta por un sensor de presión piezorresistivo en forma de valor real. Si se producen perturbaciones o cambios en el punto de ajuste, el valor real se debe mantener en una presión determinada. La cantidad de líquido dentro del tanque de presión se puede aumentar abriendo/cerrando la válvula de escape V107 si la bomba P101 está funcionando antes de usar el control de circuito cerrado (Helmich, 2008).



Figura 1.7: Tubería transparente y cilindro metálico

Esta información es útil para un mejor funcionamiento y precisión antes de tomar medidas de presión con el Manómetro.



Figura 1.8: Manómetro

Como sistema de control se puede utilizar un elemento continuo, en la figura 1.8 observaremos el diagrama de flujo del sistema de control de presión de circuito cerrado.

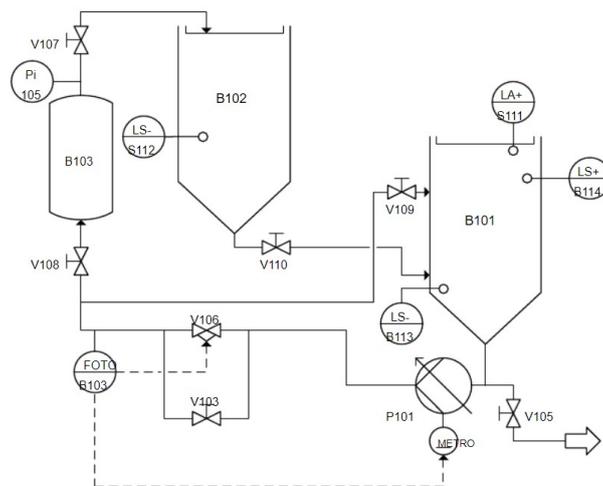


Figura 1.9: Diagrama de flujo del sistema de control de presión de circuito cerrado

Para vaciar el depósito de presión se deben abrir las válvulas manuales V 109, V 108 y V107 y desconectar la bomba P101. Tenga en cuenta que el nivel del agua del recipiente a presión no puede descender por debajo del nivel del depósito inferior B101 (Helmich, 2008).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS

En la siguiente sección revisaremos los conceptos más importantes para una mejor comprensión del estudio. Vamos a topár Controlador PID, Control PD Difuso + I y sus parámetros.

2.1. Control Clásico PID

Un controlador PID es un tipo de controlador utilizado en sistemas de control automático para regular procesos y mantener una variable de salida (o proceso) en un valor deseado o setpoint. PID representa las siglas de Proporcional-Integral-Derivativo, y este tipo de controlador se compone de 3 términos principales: Control Proporcional (P): El control proporcional de un sistema originará un error en estado estacionario frente a una entrada escalón (Ogata, 2003). La acción proporcional es directamente proporcional al error actual, lo que significa que cuanto mayor sea el error, mayor será la acción de control aplicada para corregirlo. Sin embargo, la acción proporcional por sí sola no garantiza que el sistema alcance el setpoint de manera precisa ni elimine el error en estado estable. Control Integral (I): El término integral se utiliza para eliminar el error en estado estable (error en estado estacionario) (Ogata, 2003). El control integral toma en cuenta la acumulación histórica de errores a lo largo del tiempo y aplica una corrección en función de una constante integral (K_i). Esto significa que cuanto más tiempo persista el error, mayor será la corrección acumulada que se aplicará. La acción integral ayuda a eliminar el error en estado estacionario y a mejorar la exactitud del sistema. Control Derivativo (D): El término derivativo se basa en la velocidad de cambio del error (Ogata, 2003). La acción derivativa se aplica a la tasa de cambio del error y es proporcional a la velocidad de cambio. Se utiliza para prevenir picos y oscilaciones en el sistema, especialmente cuando se está acercando al punto de referencia. El controlador PID se ajustó y sintonizó de acuerdo con las mejores prácticas establecidas en la literatura.

2.2. Controlador PD Difuso + I

Un controlador PD Difuso + I combina elementos de un controlador proporcional-derivativo (PD) y un controlador integral (I) en un sistema de control difuso. Esto significa que se utiliza lógica difusa para determinar la contribución de la acción proporcional, derivativa e integral en la señal de control para controlar un sistema. A continuación, se explican brevemente los componentes de un controlador PD Difuso + I.

Control Proporcional (P): El término proporcional en el controlador PD Difuso + I actúa de manera similar al controlador proporcional en un controlador PID convencional. Evalúa la diferencia entre la referencia deseada y la salida actual del sistema y genera una señal proporcional al error. La lógica difusa se utiliza para determinar el grado de contribución de la acción proporcional en función de la forma en que se ha definido el conjunto difuso para el error.

Control Derivativo (D): El término derivativo en el controlador PD Difuso + I realiza una acción similar al controlador derivativo en un controlador PID estándar. Calcula la tasa de cambio del error y genera una señal derivativa. Al igual que con la acción proporcional, la lógica difusa se utiliza para determinar cuánto contribuirá la acción derivativa en función de la definición del conjunto difuso para la derivada del error.

Control Integral (I): El término integral en el controlador PD Difuso + I realiza una acción de control integral, similar a un controlador integral en un controlador PID convencional. Acumula el error a lo largo del tiempo y genera una señal integral. La lógica difusa se utiliza para determinar cuánto contribuirá la acción integral en función de la definición del conjunto difuso para la integral del error.

El presente control se representa de la siguiente manera:

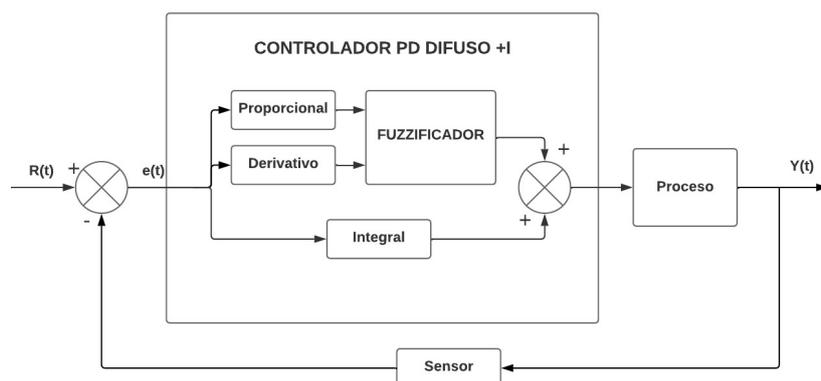


Figura 2.1: Esquema del controlador PD Difuso + I

La combinación de estos tres componentes (P, D e I) en un controlador PD Difuso + I se basa en la idea de que la lógica difusa puede manejar de manera efectiva la incertidumbre y la no linealidad en el sistema, permitiendo una adaptación flexible de la contribución de cada componente en función de las condiciones de operación y los objetivos de control. La configuración específica de un controlador PD Difuso + I y la definición de los conjuntos difusos, reglas difusas y funciones de membresía dependerán de la aplicación y del sistema que se esté controlando. La afinación y ajuste adecuados son esenciales para garantizar un buen rendimiento del controlador en una aplicación particular.

2.3. Ganancia Proporcional (K_c)

En el contexto de un controlador PD Difuso + I, la variable K_c generalmente se refiere a la ganancia del controlador proporcional (P), que es uno de los componentes del controlador difuso. La ganancia proporcional (K_c) determina la magnitud de la contribución proporcional en la señal de control generada por el controlador. La ganancia proporcional (K_c) se utiliza para multiplicar el error actual en el sistema antes de que se aplique la lógica difusa para determinar cuánta acción proporcional debe contribuir al valor de la señal de control. En otras palabras, K_c controla la "fuerza" de la acción proporcional en el controlador PD Difuso + I.

Ajustar la ganancia proporcional (K_c) es crucial para obtener el rendimiento deseado en un sistema de control PD Difuso + I. Un valor K_c más grande dará como resultado una acción

proporcional más fuerte, lo que puede ayudar a reducir el error más rápidamente, pero también puede causar oscilaciones si se ajusta incorrectamente. Un valor Kc más pequeño reducirá

la influencia de la acción proporcional, lo que puede hacer que el control sea más lento para alcanzar el valor deseado, pero puede mejorar la estabilidad del sistema. K_c en el contexto de un controlador PD Difuso + I se refiere a la ganancia proporcional que controla la magnitud de la acción proporcional en la señal de control. Ajustar adecuadamente K_c es parte del proceso de sintonización del controlador para lograr el rendimiento deseado en una aplicación específica.

2.4. Tiempo Integral (T_i)

El valor T_i refiere al Tiempo Integral o Tiempo de Integración, que es una medida del comportamiento integral en el controlador. T_i se utiliza en sistemas de control para determinar cuánto tiempo debe acumularse el error antes de que se tome una acción integral en el control. A menudo, T_i se calcula en función de la ganancia integral (K_i) del controlador integral (I).

La relación entre el tiempo integral T_i y la ganancia integral K_i es la siguiente:

$$T_i = \frac{K_c}{K_i} \quad (2.1)$$

Donde:

T_i (Tiempo Integral) es el tiempo necesario para que la acción integral acumule suficiente error para generar una señal de control significativa.

K_i (Ganancia Integral) es el parámetro que controla la magnitud de la acción integral en la señal de control.

La relación entre T_i y K_i es inversa. Esto significa que, si K_i es grande, T_i será pequeño, lo que implica que la acción integral responderá rápidamente al error acumulado. Por otro lado, si K_i es pequeño, T_i será grande, lo que significa que la acción integral responderá más lentamente

al error acumulado. Ajustar adecuadamente T_i es importante para lograr un rendimiento óptimo en un sistema de control. Un valor T_i más pequeño (K_i más grande) hará que el controlador integral responda más rápido a las fluctuaciones del error, lo que puede ayudar a eliminar el error acumulado rápidamente. Sin embargo, un valor T_i demasiado pequeño puede causar que el sistema sea propenso a oscilaciones y a comportamientos inestables.

Por otro lado, un valor T_i más grande (K_i más pequeño) hará que la acción integral sea más lenta en su respuesta al error acumulado, lo que puede hacer que el sistema sea más estable, pero también puede hacer que tarde más en eliminar el error. La elección de un valor apropiado para T_i (basado en K_i) depende de la naturaleza de la aplicación y la dinámica del sistema que se está controlando, y a menudo implica un proceso de ajuste y prueba para lograr un rendimiento óptimo.

2.5. Tiempo Derivativo (T_d)

La variable T_d se refiere al "Tiempo Derivativo," que es una medida del comportamiento derivativo en el controlador. T_d se utiliza para determinar cuánto tiempo debe considerarse la tasa de cambio del error antes de que se tome una acción derivativa en el control. La fórmula para calcular T_d generalmente está relacionada con la ganancia derivativa (K_d) del controlador derivativo (D).

La relación entre el tiempo derivativo T_d y la ganancia derivativa K_d es la siguiente:

$$T_d = \frac{K_d}{K_c} \quad (2.2)$$

Donde:

T_d (Tiempo Derivativo): es el tiempo necesario para que la acción derivativa considere la tasa de cambio del error y genere una señal de control significativa.

Kd (Ganancia Derivativa): es el parámetro que controla la magnitud de la acción derivativa en la señal de control.

La relación entre Td y Kd es inversa. Esto significa que, si Kd es grande, Td será pequeño, lo que implica que la acción derivativa responderá rápidamente a las fluctuaciones de la tasa de cambio del error. Por otro lado, si Kd es pequeño, Td será grande, lo que significa que la acción derivativa responderá más lentamente a las fluctuaciones del error. Ajustar adecuadamente Td (basado en Kd) es importante para lograr un rendimiento óptimo en un sistema de control. Un valor Td más pequeño (Kd más grande) hará que el controlador derivativo responda más rápidamente a las fluctuaciones en la tasa de cambio del error, lo que puede ayudar a mejorar la respuesta transitoria y reducir la sobre oscilación. Sin embargo, un valor Td demasiado pequeño puede hacer que el sistema sea sensible al ruido y propenso a oscilaciones no deseadas.

Por otro lado, un valor Td más grande (Kd más pequeño) hará que la acción derivativa sea más lenta en su respuesta a las fluctuaciones de la tasa de cambio del error, lo que puede hacer que el sistema sea más estable, pero también puede hacer que tarde más en ajustarse a cambios en el error. La elección de un valor apropiado para Td (basado en Kd) depende de la naturaleza de la aplicación y la dinámica del sistema que se está controlando. A menudo, se realiza un proceso de ajuste y prueba para determinar los valores óptimos de estos parámetros.

Sin embargo, para encontrar los valores finales de Kc, Ti y Td, el presente estudio se basó en el libro de Camacho, Rosales y Rivas llamado Control de Procesos (2020), en el cual se halla la tabla 4.5. Ésta despliega ecuaciones de sintonización para múltiples modelos, tomando a Tc como parámetro de ajuste. En el mismo, se ha usado los modelos de las filas A y B, dentro de contextos que se explicarán más a detalle dentro del capítulo 3: Modelado del Sistema.

2.5.1. Constante de tiempo del controlador (τ_c)

τ_c es un término que se utiliza en el contexto de sistemas de control y es comúnmente conocido como la constante de tiempo del controlador. Esta constante se refiere al tiempo necesario

para que la salida de un controlador alcance el 63.2 % (aproximadamente $1 - 1/e$) de su valor final después de que se haya aplicado un cambio en la entrada o el error de referencia.

En sistemas de control, especialmente en sistemas de control de retroalimentación, la constante de tiempo del controlador es un parámetro importante que influye en la respuesta del sistema a las perturbaciones y en su capacidad para seguir una referencia deseada. La constante de tiempo del controlador (τ_c) está relacionada con la ganancia del controlador (K_c) y otros parámetros del controlador.

2.6. Función de Membresía

Usualmente, en el marco de la teoría de conjuntos difusos, la función característica de un conjunto difuso se denomina Función de Membresía, e indica el grado con el que un elemento pertenece a dicho conjunto difuso. (Camacho, Rosales Rivas, 2020). La función de membresía en el control difuso es una parte fundamental que permite la traducción de valores numéricos en términos lingüísticos o conjuntos difusos, lo que facilita la toma de decisiones y el razonamiento basado en lógica difusa en sistemas de control.

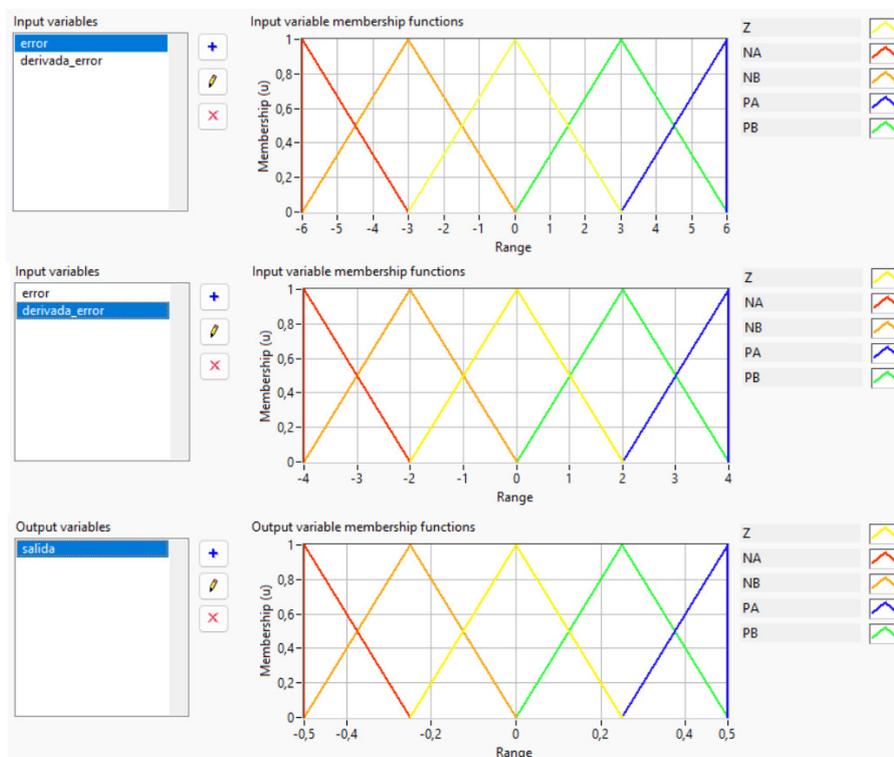


Figura 2.2: Función de Membresía

Las variables lingüísticas son componentes esenciales en los sistemas de control difuso.

Estas variables permiten expresar las condiciones y las acciones del sistema en términos lingüísticos o cualitativos en lugar de valores numéricos precisos. Las variables lingüísticas se definen mediante conjuntos difusos y funciones de membresía que describen cómo se relacionan los valores de entrada o salida con términos lingüísticos. Una de las características de los sistemas difusos es que pueden modelarse lingüísticamente usando reglas de decisión de la forma “Si - Entonces”. La habilidad en la toma de decisiones depende, entonces, de la existencia de una base de reglas y un mecanismo de razonamiento difuso. (Camacho, Rosales Rivas, 2020). En la figura 2.2 observamos las reglas utilizadas en el estudio.

		Error				
		NB	NS	ZE	PS	PB
Derivada del error	NB	NB	NS	ZE	PS	PB
	NS	NB	NS	ZE	PS	PB
	ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
	PS	NS	NS	ZE	PS	PB
	PB	NB	NS	ZE	PS	PB

Figura 2.3: Reglas de control Difuso (Ponce, 2010)

CAPÍTULO 3

MODELADO DEL SISTEMA

En la siguiente sección revisaremos cómo fue el proceso de selección de las variables, modelado y método de sintonización.

3.1. Selección de Variables de Control

Para nuestro trabajo seleccionamos las variables de presión y flujo en la estación Festo MPS/PA como los parámetros de interés para este estudio. Estas variables fueron seleccionadas debido a su relevancia en el funcionamiento eficiente del sistema, ya que son variables rápidas.

3.1.1. Flujo

El flujo se refiere al movimiento de un fluido (líquido o gas) a través de un sistema o una superficie. Puede ser el flujo de agua en una tubería, el flujo de aire a través de un conducto o el flujo de sangre a través de las arterias de un organismo. El flujo se caracteriza por la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal en un intervalo de tiempo dado. El flujo se mide generalmente en unidades de volumen por unidad de tiempo, como litros por segundo o metros cúbicos por segundo en el sistema internacional de unidades (SI).

3.1.2. Presión

La presión se refiere a la fuerza ejercida por un fluido sobre una superficie. Es la relación entre la fuerza (F) que actúa sobre una superficie y el área (A) sobre la cual actúa esa fuerza. La presión se mide generalmente en unidades de fuerza por unidad de área, como pascales (Pa) en el sistema internacional de unidades.

3.2. Sintonización de las variables

3.2.1. Método de Dahlin

En primera instancia, se conoce que ambas variables, Flujo y Presión, son caracterizados por su rapidez en su respuesta y sin tiempo muerto entre la acción de la bomba y curva de

reacción. Por lo que se comenzó con la sintonización por el método de Dahlin “Haciendo uso de la curva de reacción, se puede obtener los parámetros de la función de transferencia: Tao , t_0 y K ” (Camacho, Rosales Rivas, 2020). Se presenta la siguiente tabla:

Cuadro 3.1: Ejemplo de una tabla con nombre

Controlador	Parámetro de Ajuste	Ecuación
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	K_p	$\frac{1}{2K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1}$
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	τ_i	τ
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	τ_d	$t_0 / 2$

No obstante, al calcular de manera manual dichos valores, se encontró que, las mismas características que hacen a estas dos variables objeto de estudio, explican por qué no se puede sintonizar por este método.

Al ser su respuesta rápida en la curva de reacción, la Ganancia Proporcional (K_c) devuelve valores de dos decimales. Por escepticismo de aquellos resultados, se ejecutó múltiples ejecuciones del mismo experimento. Algunos en donde la acción de la bomba empieza en cero voltios a diez voltios, mientras que otros partiendo de la bomba ya accionada en cinco voltios hasta un valor menor al 100 % de su capacidad, como fue siete u ocho en ciertos casos.

De todas maneras, la curva de reacción se presentaba constante en sus resultados, dando un promedio a K_c de 26 en el caso de la variable de flujo y K_c de 7 en la variable de presión. Esto fue razón suficiente para decidir que este primer acercamiento a la sintonización no es favorable para el desarrollo del experimento.

3.2.2. Método de Stark

En su momento, se postuló la idea de que las variables comprendían ser no lineales, aun cuando la curva de reacción demostraba una linealidad en sus respuestas cuando la acción de la bomba se modificaba. Por lo que, se incursionó en modelos de segundo orden, como es el método de Stark. Este, se reserva para cuando se observa una forma no lineal en la respuesta de la variable. Como medida de suspicacia, se procedió a la sintonización por este método. La confianza que provenía, al ser un proceso que requería de cuatro puntos de referencia (al 15, 25,

45 y 75 %) en vez de dos, a comparación del método de Dahlin (al 28,3 y 63,2 %), fue suficiente para realizar el método de Stark.

A pesar de todo, sus valores no fueron suficientes para opacar el escepticismo que los resultados presentaban, los valores de K_c seguían siendo altos (promedio de 5 para la variable de flujo y promedio de 7 para presión). Al conocer los valores de K_c era motivo para dejar de proceder con este método de sintonización. Como tercera opción, se empleó un recurso inherente de Matlab: el comando llamado “System Identification”.

3.2.3. Comando Matlab: System Identification

Este comando propio del software Matlab estima modelos lineales y no lineales desde los datos medidos en el dominio del tiempo (Mathworks Inc., 2023). Mediante el uso de esta aplicación dentro del programa, se introdujo la curva de reacción y en el caso de la variable de flujo se hizo coincidir el modelo con la ecuación B hallada en el libro de Control de Procesos en la página 122:

Cuadro 3.2: Ecuaciones de sintonización B

Modelo	$K_c K$	T_i	T_d
$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

Dando como resultado la siguiente estimación por parte de la aplicación del programa:

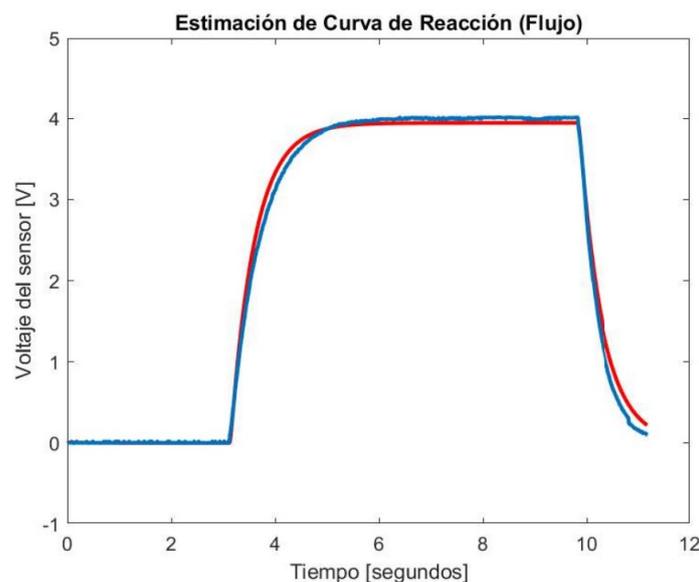


Figura 3.1: Estimación de Curva de reacción de Flujo

La estimación resultante tiene un 94,55 % de similitud con la curva de reacción que se ha ingresado para la variable de flujo. La misma aplicación es la encargada de entregar los resultados de K , τ_1 y τ_2 , requeridos para encontrar los valores de K_c , T_i y T_d .

K	τ_1	τ_2
0.39434	0.4628	0.022881

Realizando los cálculos requeridos por la tabla 3.2, se obtiene que K_c , T_i y T_d tienen los siguientes valores si el parámetro de ajuste T_c es de 0.7:

K_c	T_i	T_d
1.7595	0.4857	0.02180

De manera similar, se estimó la curva de reacción para la variable de presión, salvo que en vez de asimilar la curva de reacción con la ecuación B, se la elaboró con la ecuación A. Este cambio se fundamenta en que, al realizarlo con dos polos, la similitud de la estimación con la curva de reacción es del 2,894 %. Esto no es favorable para el experimento, por lo cual se decidió trabajar con un solo polo, y la ecuación más idónea para aquello es la ecuación A. Y cuya estimación tiene una similitud del 89.8 %.

Cuadro 3.3: Ecuaciones de sintonización A

Modelo	$K_c K$	T_i	T_d
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c}$	τ	—

Como se puede observar, la ecuación A no tiene el tiempo derivativo, lo que significa que se comprenderá de un controlador difuso P + I. Más adelante, se observará que no tiene cambio alguno en el programa de LabView empleado para el control de la Máquina Festo MPS/PA Compact Workstation.

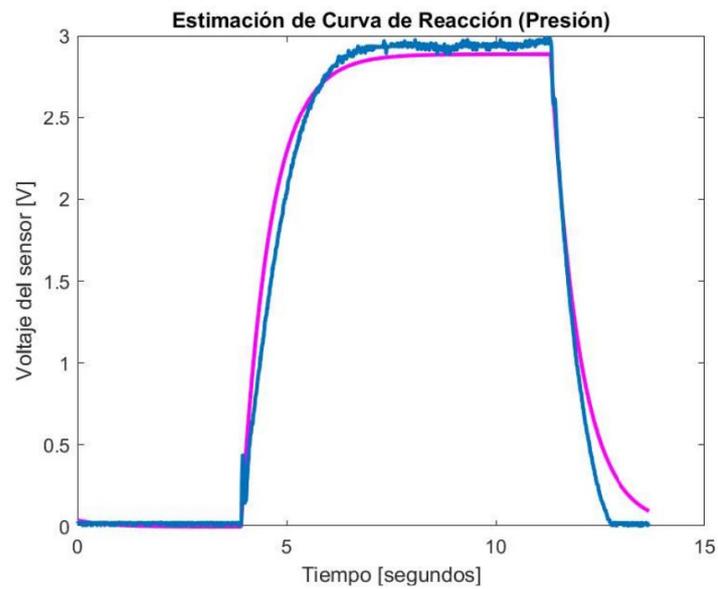


Figura 3.2: Estimación de Curva de reacción de Flujo

Del mismo modo, se obtiene que K es 0.48143, mientras que Tao 1 es 0.69438. Concediendo así a Kc y Ti con Tao c como parámetro de ajuste

Kc	T_i	T_d
1.1095	0.69438	-

Mediante la realización de esta estimación, más conocida como el modelaje del sistema, se prosigue al control de las variables.

CAPÍTULO 4

PROCESO

Se estableció un ambiente experimental controlado en la estación Festo MPS/PA. Se utilizaron sensores y actuadores adecuados para medir y controlar las variables de presión y flujo. En esta sección revisaremos la recopilación de datos, sintonización, evaluación de controladores y control de variables independientes e implementación.

4.1. Recopilación de Datos de Referencia

Se recolectaron datos de referencia durante el funcionamiento normal de la estación Festo MPS/PA sin ningún control adicional, con el fin de establecer una línea base para la comparación con los sistemas de control PID y PD Difuso + I.

4.2. Sintonización y Evaluación de Controladores

Se llevó a cabo un proceso de sintonización para ambos tipos de controladores con el objetivo de optimizar su rendimiento. Se utilizaron métricas de rendimiento relevantes para evaluar y comparar los controladores.

4.3. Control de Variables por separado

El control de las variables de presión y flujo se realizó de manera independiente. Primero, se aplicó control a la variable de flujo y luego a la variable de presión. Esto resultó en un control exacto y robusto en comparación con la operación de la bomba de agua sin control automático (control PID).

4.4. Implementación de Controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Se programaron e implementaron los controladores PID en un entorno de control específico para la máquina Festo MPS/PA.

A continuación se mostrará el diseño en LabView de las dos variables.

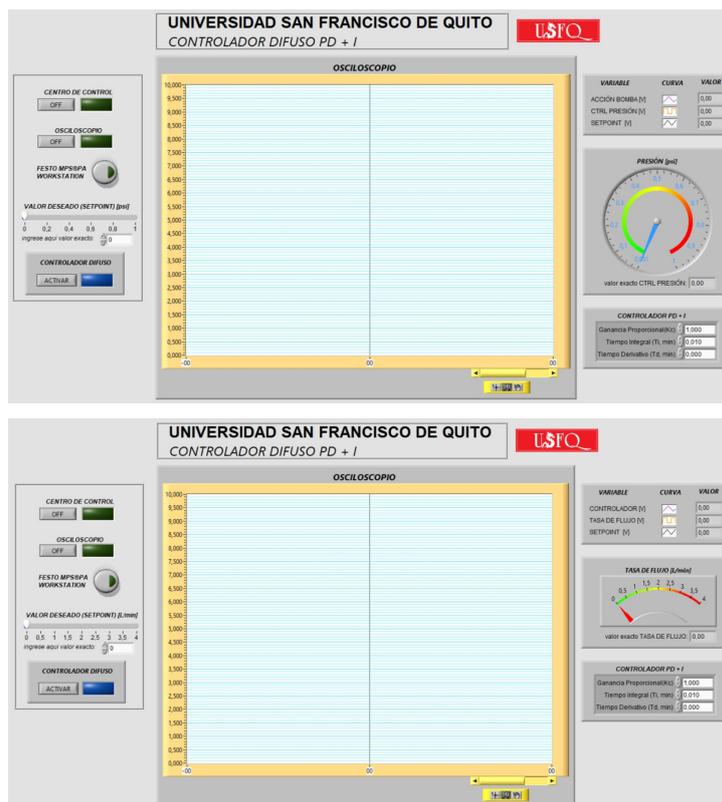


Figura 4.2: Diseño en LabView de controlador PID y PD Difuso + I de Presión y Flujo

La interfaz del programa es modular y regular, en su parte izquierda se encuentran los botones para activar el panel de control, el osciloscopio y la Festo MPS/PA Workstation. Debajo de los botones se halla el deslizador que permite al usuario ingresar el valor deseado de flujo en litros por minuto (L/min) o en el caso de la presión en libras por pulgada cuadrada (PSI).

Se considera que la máquina, al ser una estación didáctica, se encuentra limitada el actuador en el cual se halla el controlador, es decir el motor y bomba (M101/P101). Puede admitir de cero a diez voltios y no veinticuatro voltios como el fabricante lo ha diseñado. Esto se traduce a un flujo máximo de cuatro litros por minuto y una presión máxima de dos libras por pulgada cuadrada. Por último, en esta sección, se halla el botón activador de lógica difusa. Esto, activa el controlador difuso en el programa si así lo requiere el usuario. Por defecto, el controlador difuso se encuentra desactivado, creando un bypass en el programa que se salta la lógica difusa, y se suman las tres partes del controlador (Proporcional, Integral y Derivativo) en el mismo sumador, teniendo como resultado un controlador PID clásico.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN

En esta sección, exploraremos en detalle cómo se implementó el proyecto, se describirán los pasos, las técnicas y las estrategias utilizadas para alcanzar los objetivos establecidos.

5.1. Ejecución

Para poder censar la presión se activa el motor y empieza a bombear el líquido, la válvula v107 debe estar parcialmente abierta, seguido de esto se activa la bomba y por medio de la tubería se observó el líquido llegar hasta la mitad de longitud de esta. Como ya fue mencionado anteriormente, decimos que si el líquido llegó hasta la mitad de la longitud del tubo, el cilindro metálico también tiene el mismo nivel de líquido, sin embargo, su volumen sería mayor dentro del mismo. Seguido de esto, se procede a cerrar la válvula y apagar el motor para que el líquido se mantenga en un sistema cerrado y poder recopilar los datos por medio del sensor de presión activando nuevamente la bomba, el actuador comenzará a ejercer presión dentro del sistema cerrado. Por motivos didácticos, la máquina MPS/PA se encuentra limitada para evitar daños críticos a la estructura de las tuberías, válvulas y demás componentes ya que la máquina es utilizada por estudiantes. Si el motor se llega a activar al 100 % de su capacidad, la presión monitoreada por el sensor llegará a su máximo. Y equivalentemente si se reduce la actuación del motor, la presión disminuirá. Por otro lado, se realizó un programa capaz de activar y manipular la máquina MPS/PA por medio de sus actuadores. Este programa fue elaborado en el software LabView y el canal de comunicación entre la computadora y la máquina es a través de EasyPort, proporcionado por la compañía Festo. El software LabView viene integrado con varios plug-ins para la comunicación en el Easyport y los varios actuadores de la máquina. Mediante trabajos anteriormente hechos en los cuales se ha utilizado la máquina de MPS/PA, se ha tomado como referencia para la elaboración de un programa propio y personalizado en el cual se pueda observar el comportamiento de las variables de flujo y presión. Dentro de este programa se

requiere ver y manipular el actuar de estas variables. Seguido de esto, se procedió a buscar la curva de reacción de la variable de flujo y la variable de presión, independientemente una de la otra. Para eso se ejecutó el programa y de esa manera se pudo recuperar los datos mientras se activa el motor desde su estado de reposo hasta su capacidad máxima que son 10V. Debido a eso, cuando se activa el programa para recuperar la curva de reacción, se pasa de suministrar 0V a 10V. En el caso del flujo, al realizar este proceso el líquido recircula en el circuito cerrado, debido a esto el sensor de flujo arroja programa de datos en voltios que van desde el estado de reposo hasta llegar a su límite. Repetimos los mismos pasos en el caso de la presión. A esta curva obtenida por los datos censados se la llama curva de reacción, ya que es, como su nombre lo dice, la reacción de la variable ante el estímulo del actuador. Lo que se requiere de esta curva de reacción es poder modelar para así generar un control automático. El siguiente paso fue realizar esta modelación en el programa Matlab, para conveniencia y agilidad de la investigación se sintonizó mediante el comando System Identification en matlab.

Al poner en funcionamiento la máquina, se obtuvieron los siguientes resultados.

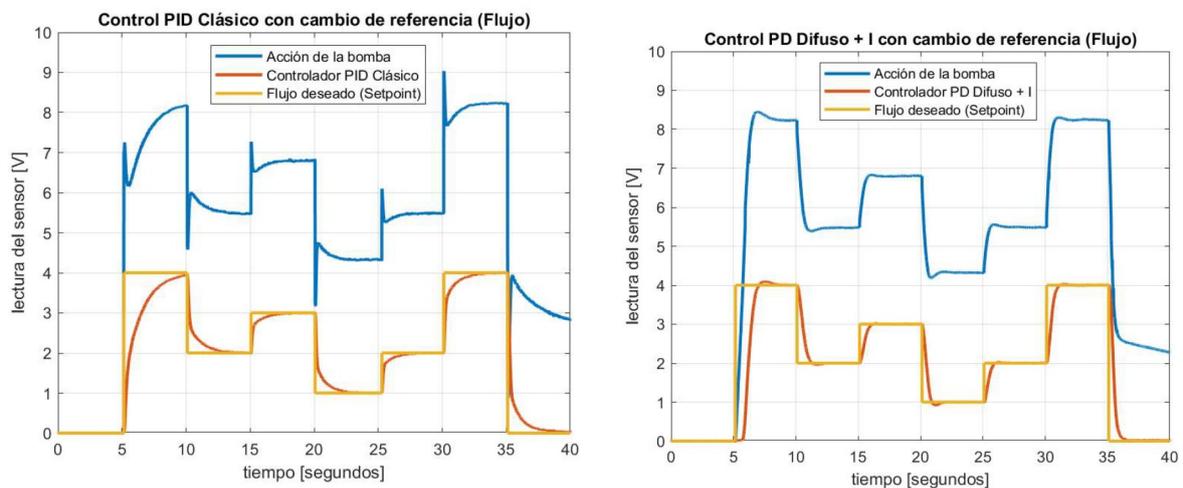


Figura 5.1: PID Clásico vs. PD Difuso + I para Flujo con cambio de referencia

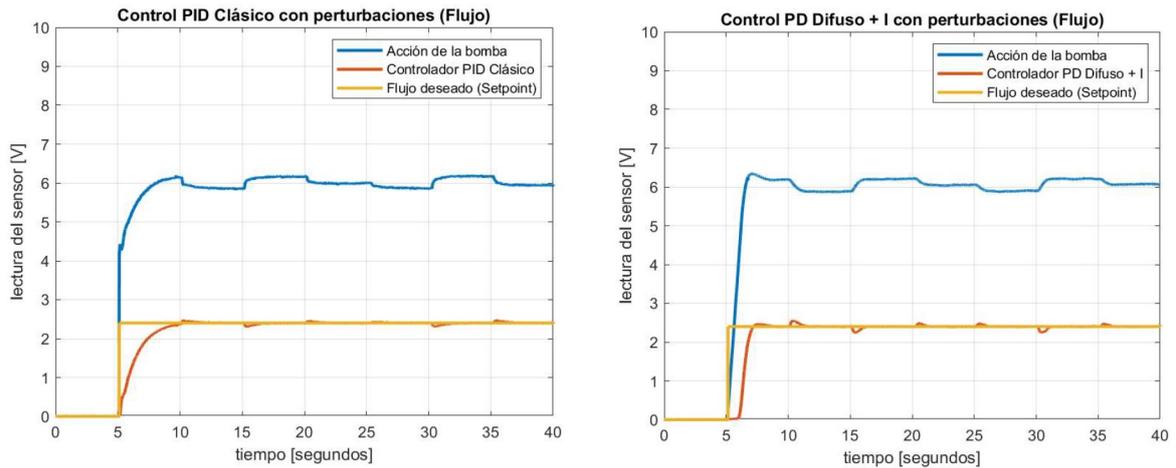


Figura 5.2: PID Clásico vs. PD Difuso + I para Flujo con perturbaciones

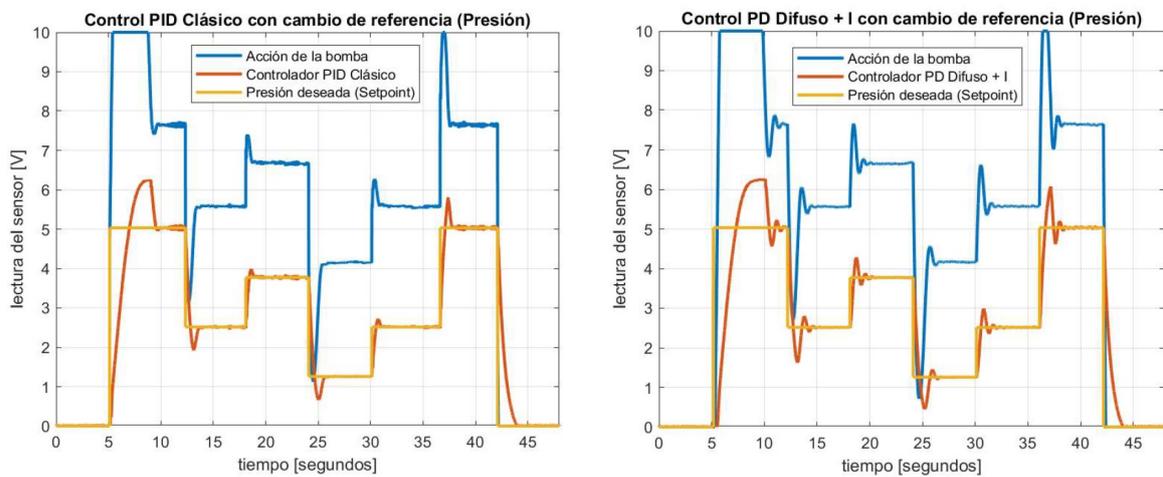


Figura 5.3: PID Clásico vs. PD Difuso + I para Presión con cambio de referencia

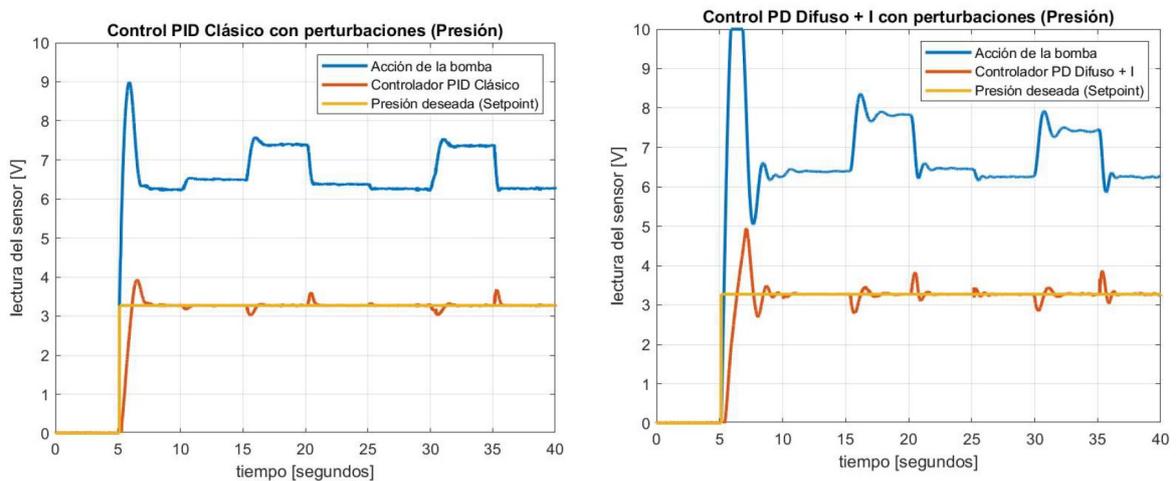


Figura 5.4: PID Clásico vs. PD Difuso + I para Presión con perturbaciones

CAPÍTULO 6

ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Los índices de desempeño son herramientas para medir cuán efectivamente el controlador mantiene una variable de proceso en un valor deseado. Estos índices, como el Error Integral Absoluto (IAE) o el Tiempo de Asentamiento (Ts), proporcionan información clave sobre el rendimiento del sistema de control. Por ejemplo, el IAE mide la acumulación de errores absolutos a lo largo del tiempo, mientras que el Ts indica cuánto tiempo toma al sistema estabilizarse. Un sobrepico bajo es una meta común. Estos índices ayudan a los ingenieros a ajustar y optimizar el controlador para lograr la regulación deseada en términos de velocidad de respuesta, estabilidad y precisión. El IAE mide la acumulación de errores absolutos a lo largo del tiempo. Es útil para evaluar cuánto se desvía la variable controlada del setpoint y cuánta energía se ha gastado en el proceso de control.

	FLUJO			
	Cambio de referencia 50 % al 75 %		Perturbaciones 50 % al 100 %	
	Clásico	Difuso	Clásico	Difuso
Tiempo de establecimiento	2.9975	3.64	2.28	1.12
Sobrepico	0	2.07	3.24	5.12
IAE	3825.22	3777.69	3030.79	3018.84

Cuadro 6.1: Índices de desempeño de Flujo

	PRESIÓN			
	Cambio de referencia 50 % al 75 %		Perturbaciones 50 % al 100 %	
	Clásico	Difuso	Clásico	Difuso
Tiempo de establecimiento	3.15	2.94	4.48	6.13
Sobrepico	5.24	12.425	5.24	16.37
IAE	6856.85	6895.44	6222.12	6255.26

Cuadro 6.2: Índices de desempeño de Presión

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El enfoque metodológico abordó aspectos clave, que incluyeron la modelación del sistema y la implementación de controladores en LabView. Este enfoque permitió lograr un control independiente de las variables de presión y flujo, lo que se tradujo en mejoras sustanciales en la eficiencia del sistema Festo MPS/PA. En base a los índices y resultados analizados en ambos sistemas de control para las variables de flujo y presión, se observó como el controlador difuso suaviza la acción de control debido a que conmuta entre las reglas. Esto favorece y alarga la vida útil del motor y también de la bomba. Sin embargo, con el controlador difuso existen sobrepicos mayores, el tiempo de establecimiento es mejor en el controlador PID clásico. Estos resultados sugieren que el controlador PID sigue siendo la elección preferida a nivel industrial, ya que ofrece un control más preciso y una respuesta más eficiente. Sin embargo, es importante recordar que la elección del controlador debe basarse en una evaluación completa que incluya otros factores como la complejidad del diseño, la robustez y los costos asociados.

BIBLIOGRAFÍA

- Anchitipan Naranjo, E. M. (2020). Diseño, simulación y comparación de esquemas de control adaptativo aplicados a plantas no lineales de parámetros variables y retardo de tiempo dominante (*Bachelor's thesis, Quito, 2020.*).
- Camacho, O., Rosales, A., Rivas, F. (2020). Control de procesos. Quito - Ecuador: *EPN Editorial*
- Helmich, J. (2008). Adiro. *Manual MPS-PA Compact Workstation.*[En línea], 12.
- Kassir, E. E. (2015). Sistemas De Control Difuso. *Eslava Zuluaga, AF.*
- Kodosky, J. (2020). LabVIEW. *Actas de la ACM sobre lenguajes de programación* , 4 (HOPL), 1-54.
- Marlin, T. E. (2015). Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance Modelling. *Chemical Engineering Series, McGraw-Hill, New York, 78-79.*
- Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. *Pearson Educación.*
- Ponce, P. (2010). Inteligencia artificial: con aplicaciones a la ingeniería. *Alpha Editorial.*
- Salazar Navarrete, G. E. (2022). Desarrollo de un controlador adaptativo neuro-fuzzy PID (*Bachelor's thesis, Quito.*).
- Smith, C. A. (2002). Automated continuous process control. *John Wiley Sons.*
- Ulloa Herrera, F. R. (2018). Diseño e implementación de un sistema virtual para un sistema multivariable no lineal de cuatro tanques (*Bachelor's thesis, Quito, 2018.*).