

DISEÑO DE CONTROLADORES P, PI Y PID PARA EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN SERVO-SISTEMA HIDRÁULICO, BASADO EN DESARROLLO EXPERIMENTAL

MARÍA ELENA ANAYA PÉREZ*, VÍCTOR HUGO BENÍTEZ BALTAZAR,
JESÚS HORACIO PACHECO RAMÍREZ, FÉLIX MONTAÑO VALLE

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de controladores Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID), utilizando modelado matemático, simulación e implementación electrónica del comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, a través de la aplicación de la técnica de sintonización de Ziegler – Nichols basada en una metodología experimental para distintos puntos de operación. En la parte experimental de este trabajo son usados instrumentos de medición como *data logger*; la simulación del sistema se lleva a cabo en la plataforma de Matlab®. Además, el software ADAMView® es utilizado en el diseño de tres tipos de controladores: P, PI y PID, aplicados a diferentes puntos de operación de la planta.

Palabras-clave: Controladores industriales, Técnicas de sintonización, Prototipos educativos.

ABSTRACT

This article describes the design of Proportional (P), Proportional Integral (PI) and Proportional Integral Derivative (PID) controllers, using mathematical modeling, simulation and electronic implementation of the dynamic behavior of a servo-hydraulic system, through the application of Ziegler – Nichols' tuning technique based on an experimental methodology for different operating points. During the experimental section of this work, measuring instruments are used as data logger; system simulation is performed in Matlab® platform. Additionally, the ADAMView® software is used in the design of three types of controllers: P, PI and PID, applied to different parts of plant operation.

Keywords: Industrial controllers, Tuning techniques, Educational prototypes.

M.C. MARÍA ELENA ANAYA PÉREZ
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Sonora/ Universidad Popular
Autónoma del Edo. de Puebla
Correo: meanaya@industrial.uson.mx
DR. VÍCTOR HUGO BENÍTEZ BALTAZAR
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad de Sonora
Correo: vbenitez@industrial.uson.mx

M.C. JESÚS HORACIO PACHECO RAMÍREZ
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Sonora/ Universidad de Arizona
Correo: jpacheco@industrial.uson.mx
M.C. FÉLIX MONTAÑO VALLE
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad de Sonora
Correo: felixm@industrial.uson.mx

INTRODUCCIÓN

Existe una gran variedad de aplicaciones de sistemas de control en plantas de procesos industriales tales como petroleras, gaseras, químicas, farmacéuticas, alimentos y bebidas, agua, pulpa y papel, red de energía, minería, metales, etcétera. La importancia de las aplicaciones en el mundo real de los conceptos fundamentales de control es un tema clave para el ingeniero que desea especializarse en el área de control de procesos, siendo ésta una oportunidad en el ámbito industrial tanto en la implementación directa para el caso de plantas industriales en funcionamiento, como en la investigación para su diseño, desarrollo y modificación en equipos experimentales y control de sistemas interrelacionados y complejos (1). En (2) se presenta un caso de aplicación de diseño de un controlador PID para un sistema hidráulico industrial, en el que se hace énfasis en el uso amplio de este tipo de sistemas en la industria. También se puede revisar en la literatura la experiencia del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla (3), el cual desarrolló un trabajo sobre la implementación práctica de un controlador PID utilizando ajuste empírico de acuerdo a la técnica de Ziegler-Nichols y proporcionando información sobre las ventajas y desventajas de este tipo de controladores. Por otro lado, en (4) se hace énfasis en la importancia de realizar experimentos en los laboratorios como medida de control para reafirmar los conocimientos teóricos adquiridos, además de descubrir nuevos conocimientos. Así el objetivo del presente trabajo es mostrar los resultados obtenidos a través de la investigación realizada sobre el diseño de controladores P, PI y PID para un sistema al cual tienen acceso estudiantes del Departamento de Ingeniería Industrial y posgrado en Ingeniería Industrial de la Universidad de Sonora, comprobando el desempeño de

los diseños obtenidos con la información teórica, además de tomar la decisión de cuál de ellos es el más adecuado para el sistema en estudio, llevando a cabo un análisis de los resultados obtenidos. De esta forma se puede comprender mejor la razón por la cual ciertos tipos de controladores son más utilizados y recomendados para aplicaciones industriales.

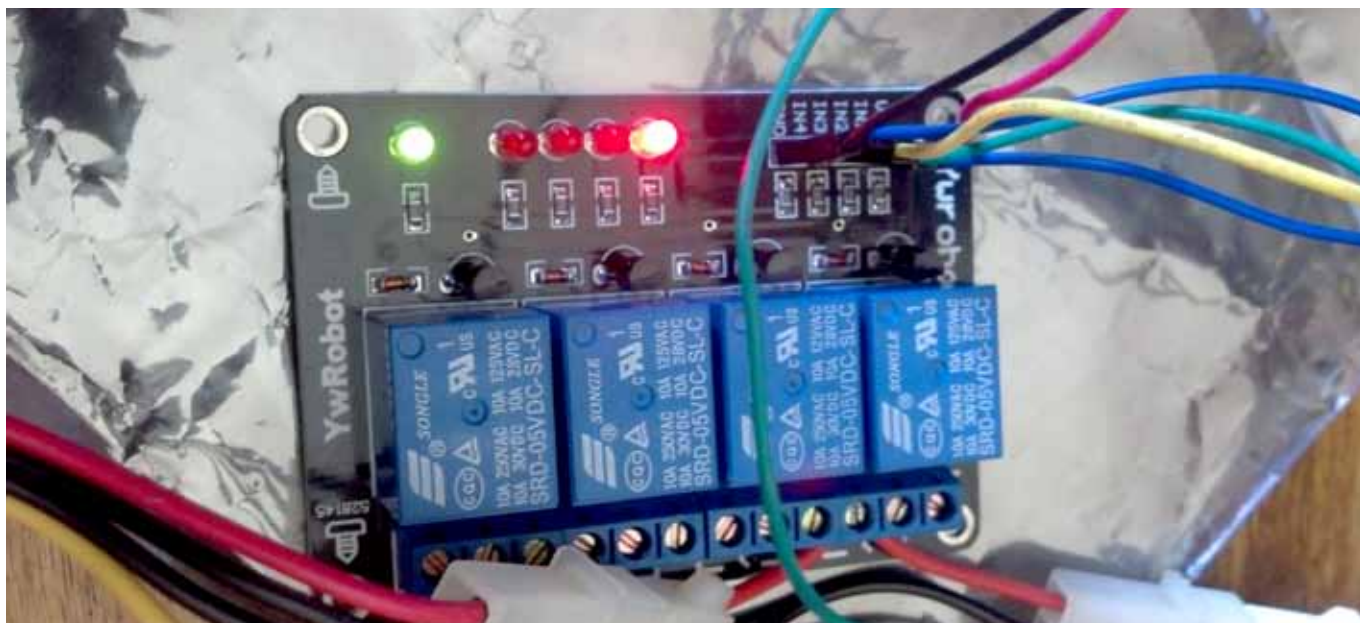
FUNDAMENTOS DE LOS CONTROLADORES Y METODOLOGÍA UTILIZADA

Estructura básica de un servo-sistema hidráulico

Un servo-sistema hidráulico es un conjunto de componentes individuales, interconectados para proporcionar una forma deseada de transferencia hidráulica. La estructura básica consta de:

- Fuente de alimentación hidráulica.
- Elementos de control (válvulas, sensores, etcétera).
- Accionamiento (cilindros y / o de motor).
- Otros elementos (tuberías, dispositivos de medición, etcétera).

En un sistema hidráulico básico, la bomba convierte la potencia disponible del motor primario a potencia hidráulica en el actuador. Las válvulas son utilizadas para controlar la dirección del flujo de la bomba, el nivel de potencia producido y la cantidad de fluido y presión hacia el actuador. Un actuador lineal o rotativo convierte la potencia hidráulica a potencia mecánica. El medio, un líquido, proporciona la transmisión y el control directo, así como la lubricación de componentes, sello de válvulas, y enfriamiento del sistema. Los conectores dirigen la potencia del fluido bajo presión y el flujo de fluido regresa al depósito. Finalmente, el fluido almacenado y el equipo acondicionado aseguran suficiente calidad y cantidad, y enfriamiento del fluido (5).



La preferencia al uso de servo-válvulas es debida a su rapidez en respuesta direccional, presión y control de fluido, por ello, frecuentemente se encuentran en arreglos de control de lazo cerrado para producir un rendimiento altamente sofisticado, requerido por los equipos modernos. Actualmente las servo-válvulas (Figura 1) son ampliamente utilizadas en distintas áreas industriales como la minera, agricultura, transporte, embarques y en control de procesos, el cual tiene el objetivo de mantener y regular las condiciones de un proceso dentro del margen óptimo de valores deseados (5).

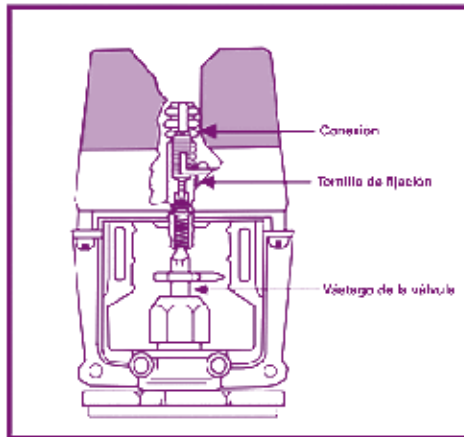


Figura 1. Componentes principales de una servo-válvula.

Diseño basado en una metodología experimental

En el análisis y diseño experimental de sistemas de control, el uso de señales de prueba se justifica porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común, el orden del sistema y su capacidad de manejar las señales de entrada reales. Las señales de prueba que regularmente se usan son: las funciones escalón, rampa, parábola, impulso, etcétera. Con estas señales de prueba es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, ya que las señales son funciones del tiempo muy simples (6).

De acuerdo a (6), una característica importante del comportamiento dinámico de un sistema de control es la estabilidad absoluta, la cual, de forma cualitativa se clasifica como sistema estable, críticamente estable o inestable.

Existe una amplia clasificación de controladores industriales, pero de acuerdo a sus acciones de control presenta la siguiente clasificación (6):

- De dos posiciones o controlador *on-off*.
- Controlador proporcional (P).
- Controlador integral (I).
- Controlador proporcional-integral (PI).
- Controlador proporcional-derivativo (PD).
- Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).

Es interesante señalar que más de la mitad de los

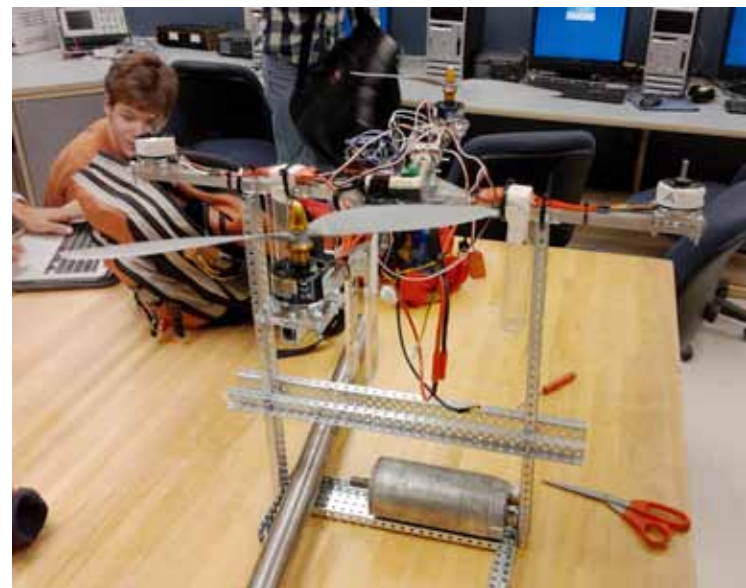
controladores industriales que se usan en la actualidad utilizan esquemas de control PID o PID modificados. Como casi todos los controladores PID se ajustan en el sitio de forma experimental, lo que se conoce como sintonización, se pueden encontrar propuestas de muchos tipos diferentes de reglas para llevar a cabo una sintonización precisa de los controladores PID en el sitio.

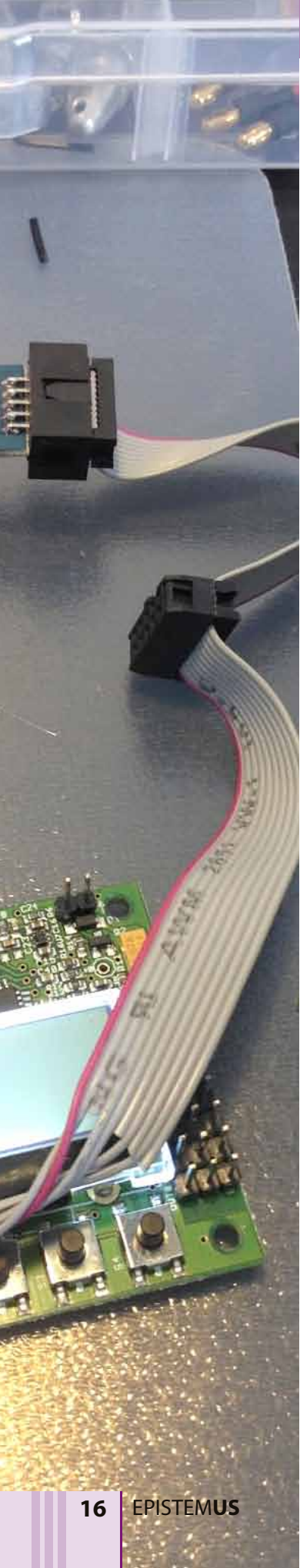
Los controladores PID se aplican generalmente a la mayoría de los sistemas de control industrial. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos.

Controladores PID en la industria de procesos

Es ampliamente conocido el éxito que ha tenido la aplicación del control PID en los procesos industriales. Con su funcionalidad de tres términos ofreciendo tratamiento tanto para respuesta transitoria como para respuesta en estado estacionario, el control PID provee una solución genérica y eficiente para los problemas de control presentes en el mundo real (7).

La amplia aplicación del control PID ha estimulado y sostenido la investigación y desarrollo para obtener el mejor desempeño del PID (8) y la búsqueda continua con la finalidad de encontrar la próxima clave en tecnología o metodología para la sintonización de estructuras PID (9). Los controladores PID funcionan de manera exitosa ya que operan en la mayoría de procesos lineales invariantes en el tiempo (LTI) y de una entrada una salida (SISO). Una vez que se sintoniza un controlador es de interés realizar el proceso de optimización(10). Existen diferentes técnicas de optimización para sintonizar los controladores, entre las cuales se pueden mencionar las de Ziegler y Nichols (1942), Cohen and Coon (1953), O'Connor and Denn (1972), Borresen and Grindal (1990), Connell (1996) y Sycros and Kooks (2005) (11).





Una de las estructuras estándar de controladores PID es la estructura paralela y funcionalidad de los tres términos. Esta estructura se refiere a la función de transferencia de un controlador PID, la cual se puede expresar en su forma ideal como:

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (1)$$

en donde $U(s)$ es la señal de control actuando en la señal de error $E(s)$, K_p es la ganancia proporcional, T_I es la constante de tiempo integral, T_D es la constante de tiempo derivativo, y s es el argumento de la transformada de Laplace. La señal de control también puede ser expresada en tres términos como:

$$U(s) = K_p E(s) + K_I \frac{1}{s} E(s) + K_D s E(s) = U_p(s) + U_I(s) + U_D(s) \quad (2)$$

en donde $K_I = K_p/T_I$ es la ganancia integral y $K_D = K_p T_D$ es la ganancia derivativa. La función de cada uno de los tres términos incluye:

- 1) El término proporcional provee una acción global de control proporcional a la señal de error a través del factor de ganancia dejando pasar todo tipo de frecuencias: $K_p E(s)$.
- 2) El término integral reduce los errores en estado estacionario a través de compensación de baja frecuencia: $K_I \frac{1}{s} E(s)$.
- 3) El término derivativo mejora la respuesta transitoria a través de una compensación de alta frecuencia: $K_D s E(s)$.

Aunque el término derivativo mejora la respuesta transitoria y la estabilidad (Tabla1), este comportamiento generalmente se expone de forma errónea por las razones que a continuación se describen. En diversas aplicaciones de ingeniería se ha encontrado que el término derivativo puede degradar estabilidad cuando existe un retraso de transporte. Más aún, la dinámica del término derivativo tiende a amplificar las señales de alta frecuencia y la implementación en tiempo real puede resultar en la saturación de actuadores y la inestabilidad provocada por el ruido eléctrico. La dificultad en la sintonización del término K_D ha provocado que muchos ingenieros eliminen el término derivativo, así, para un desempeño óptimo, se recomienda que K_p , K_I y K_D sean sintonizados de manera conjunta. Los efectos individuales de los tres parámetros en un sistema de lazo cerrado de plantas estables se presentan en la tabla1.

Tabla1. Efectos de los términos P, I y D en el desempeño dinámico de un sistema de control.

	Tiempo de Subida	Saturación	Tiempo de estabilización	Error en estado estacionario	Estabilidad
Incrementa K_p	Decremento	Incremento	Pequeño incremento	Decremento	Reducción
Incrementa K_I o T_I	Pequeño decremento	Incremento	Incremento	Gran decremento	Reducción
Incrementa K_D o T_D	Pequeño decremento	Decremento	Decremento	Cambios menores	Mejora

Fórmula empírica para la sintonización de controladores de Ziegler-Nichols

Una fórmula empírica de sintonización, fue propuesta por Ziegler y Nichols a principios de 1942. La fórmula se aplica cuando el modelo de la planta se obtiene a partir de una función de primer orden más un tiempo muerto, pudiendo ser expresada por la función (3) de acuerdo a la figura 2 (12).

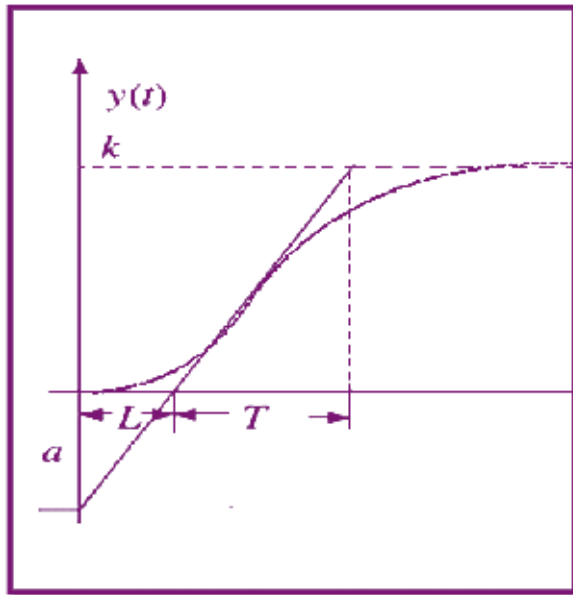


Figura 2. Tiempo de respuesta en planta con tiempo muerto.

$$G(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL} \quad (3)$$

En sistemas de control de procesos en tiempo real, una gran variedad de plantas pueden ser modeladas aproximadamente por la función de transferencia (3). Si el modelo del sistema no puede derivarse físicamente, es posible realizar experimentos con la finalidad de extraer los parámetros para aproximar el modelo (3). Por ejemplo, si la respuesta a la entrada escalón en el modelo de la planta es como la mostrada en la figura 2, entonces los parámetros de k , L y T pueden extraerse de una forma sencilla. Con los valores de L y $a = kL/T$, y utilizando la información proporcionada en la tabla 2 sobre las fórmulas de sintonización, pueden obtenerse los parámetros para los tipos de controladores P, PI y PID (12).

Tabla 2. Fórmulas de sintonización de Ziegler-Nichols.

Tipo de controlador	K_p	T_I	T_D
P	$1/a$	∞	0
PI	$0.9/a$	$3L$	0
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

Implementación del experimento para la obtención del modelo

El servo-sistema hidráulico en estudio, se encuentra representado por el diagrama de bloques que a continuación se presenta (Figura 3):

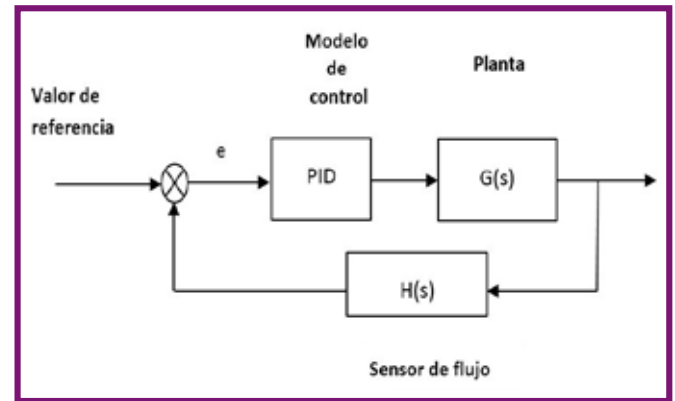


Figura 3.- Diagrama de bloques del servo-sistema hidráulico.

En esta sección, consideraremos el caso de que el modelo matemático de la planta es desconocido, lo cual, sucede a menudo en los sistemas industriales. Considerando la referencia (5), respecto a que este tipo de sistemas tienen un tiempo muerto al inicio de su funcionamiento, se realiza un experimento, basado en (12), el cual consiste en instrumentar el servo-sistema hidráulico con un osciloscopio para obtener las respuestas a distintas señales de prueba. En la figura 4 de los incisos "a" al "d", se presentan imágenes de cómo se montó el experimento mostrando el sistema instrumentado con un osciloscopio usado como *data logger* al módulo ADAM-4022T (13), y una de las gráficas de señal de la respuesta del sensor de flujo, obtenidas con el osciloscopio.

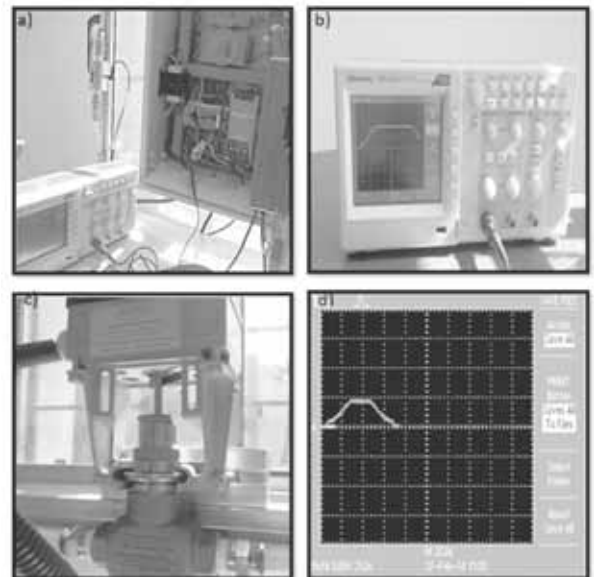


Figura 4. Imágenes del experimento realizado: a) Osciloscopio conectado al módulo ADAM-4022T (13), b) Osciloscopio tomando la señal de respuesta de la servo-válvula, c) Apertura de servo-válvula, y d) Señal de respuesta en osciloscopio para 5 volts.



RESULTADOS

Modelado

A continuación se procede a obtener el modelo matemático del comportamiento dinámico del servosistema hidráulico en estudio, para las entradas al sistema de 5, 6 y 8 volts, transfiriendo los datos adquiridos a través del experimento con el osciloscopio a la plataforma de MATLAB®, como se muestra en la figura 5.

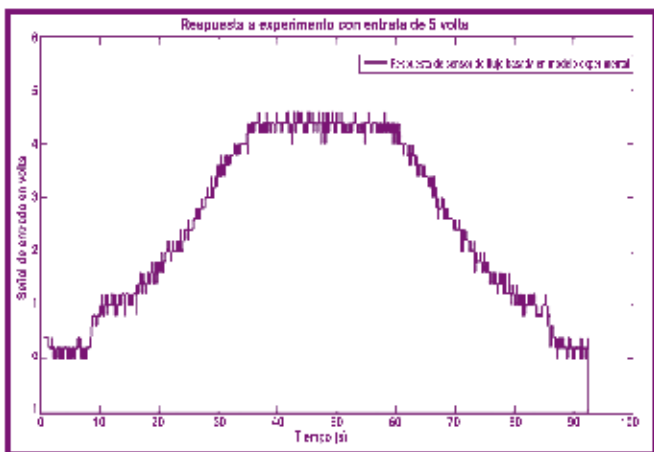


Figura 5. Respuesta de sensor de flujo a entrada de 5 volts basado en modelo experimental.

La expresión (3) es el modelo matemático obtenido utilizando los valores para k , L y T ; de acuerdo a la referencia (12), mostrando en la figura 6 la entrada de 5 volts.

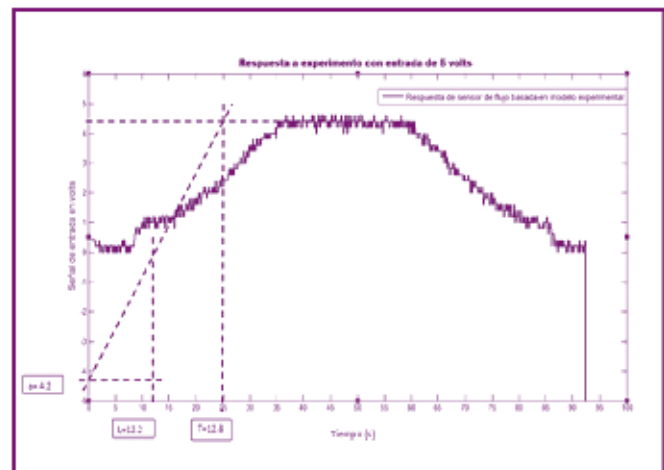


Figura 6. Obtención de los valores para α , k , L y T , basado en modelo experimental.

La tabla 3 presenta los valores de los parámetros obtenidos para las entradas de 5, 6 y 8 volts junto con el modelo matemático obtenido utilizando la expresión (3).

Tabla 3. Modelos representativos de comportamiento dinámico del servosistema hidráulico para los casos de 5, 6 y 8 volts de entrada.

Entrada en volts	a	K	L	T	Modelo matemático de la planta	
5	4.2	4.37	12.2	12.7	$G(s) = \frac{4.37}{1 + 12.7s} e^{-(12.2)s}$	(4)
6	2.3	6.133	12	32	$G(s) = \frac{6.133}{1 + 32s} e^{-(12)s}$	(5)
8	2.4	8.291	11	38	$G(s) = \frac{8.291}{1 + 38s} e^{-(11)s}$	(6)

Diseño de controladores P, PI y PID con ADAMView®

Con el modelo (1), las expresiones para cada tipo de controlador se obtuvieron utilizando las fórmulas proporcionadas en la tabla 2 y la información de la tabla 3. Los parámetros y modelo matemático para cada tipo de controlador son presentados en la tabla 4.

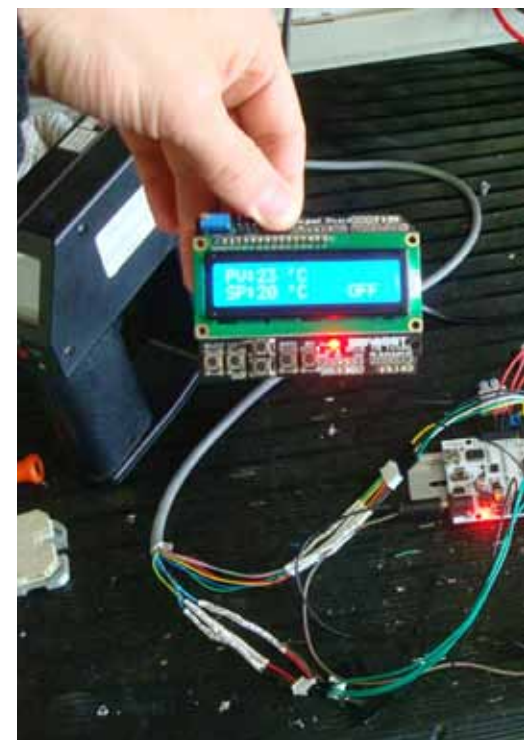
Tabla 4. Parámetros y modelo matemático para controladores P, PI y PID.

Entrada en volts	Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d	Modelo matemático del controlador	
5	P	0.238	-	-	$G(s) = 0.238$	(7)
	PI	0.214	36.6	-	$G(s) = \frac{7.832s + 0.214}{36.6s}$	(8)
	PID	0.286	24.4	6.1	$G(s) = \frac{148.84s^2 + 16.978s + 0.286}{24.4s}$	(9)
6	P	0.435	-	-	$G(s) = 0.435$	(10)
	PI	0.391	36	-	$G(s) = \frac{14.076s + 0.391}{36s}$	(11)
	PID	0.522	24	6	$G(s) = \frac{144s^2 + 12.528s + 0.522}{24s}$	(12)
8	P	0.417	-	-	$G(s) = 0.417$	(13)
	PI	0.375	33	-	$G(s) = \frac{12.375s + 0.375}{33s}$	(14)
	PID	0.5	22	5.5	$G(s) = \frac{60.5s^2 + 11s + 0.5}{22s}$	(15)

Utilizando la tabla 4, se implementan los controladores P, PI y PID para los diferentes puntos de operación utilizando datos generados con software ADAMView®(14) y el controlador digital Módulo ADAM-4022T (13).

Simulación del comportamiento de los modelos de controladores obtenidos

Con un programa codificado en MATLAB® es posible llevar a cabo la simulación para los modelos obtenidos con la finalidad de comparar la simulación con el gráfico generado en tiempo real. Posteriormente se utilizará el modelo matemático en el diseño del controlador usando el software ADAMView®(14) en la programación y adquisición de datos para ser transferidos a la plataforma de MATLAB®.



En la figura 7 se aprecia la gráfica obtenida a través de la simulación realizada con el modelo para el caso de la entrada de 5 volts, con la gráfica obtenida en el experimento.

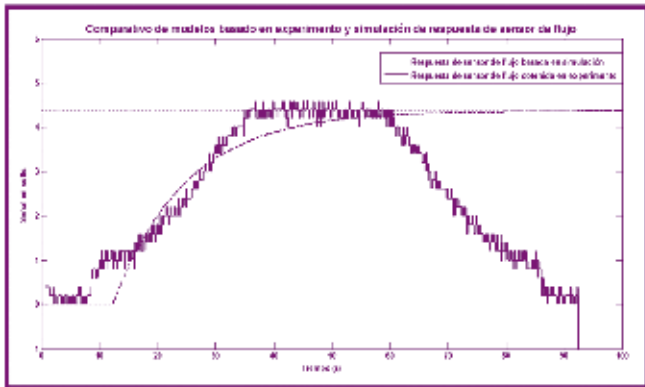


Figura 7. Comparativo de modelos experimental vs simulación.

A continuación, y sin pérdida de generalidad, se presentan las gráficas generadas en MATLAB® del comportamiento de los controladores P, PI y PID para la entrada de 5 volts. Se utilizan los valores de la tabla 4 como parámetros de inicio en el proceso de sintonización, de acuerdo a la técnica de Ziegler-Nichols (12).

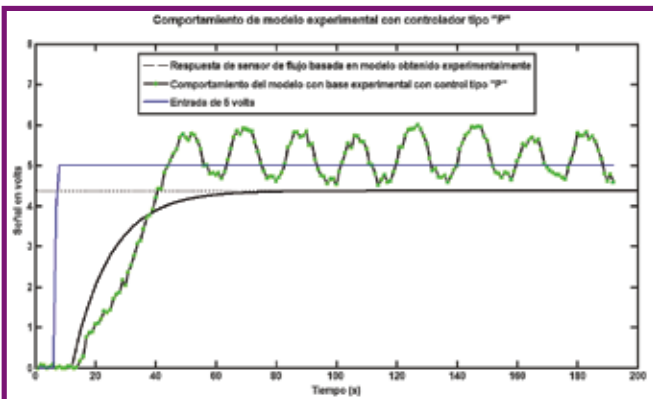


Figura 8. Servo-sistema hidráulico con control tipo P.

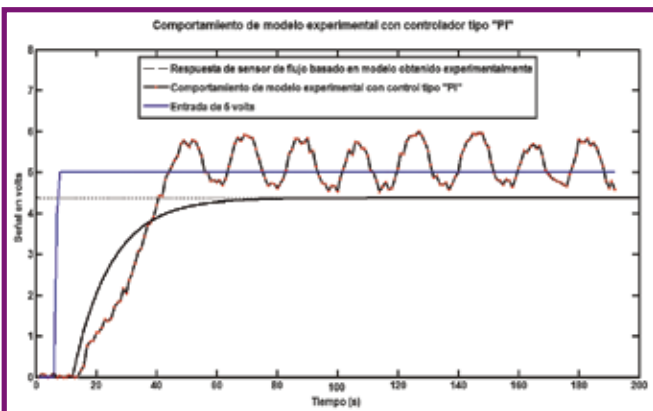


Figura 9. Servo-sistema hidráulico con control tipo PI.

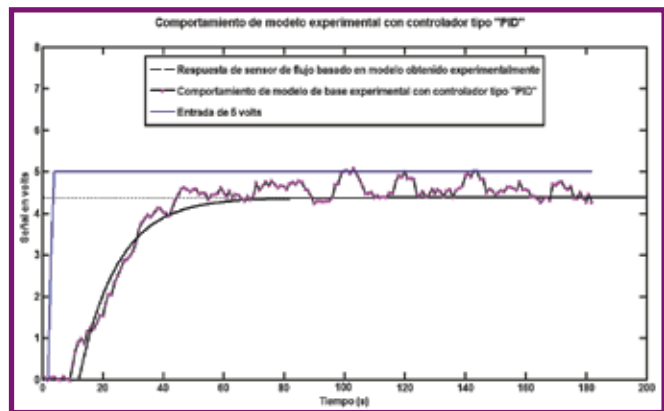


Figura 10. Servo-sistema hidráulico con control tipo PID.

Un análisis comparativo en la respuesta del sensor de flujo se puede llevar a cabo al simular el comportamiento de los tres tipos de controladores, lo cual se observa en las gráficas mostradas en las figuras 11, 12 y 13; para con ello concluir que es lo más recomendable, de acuerdo a lo que se mencionó en la sección *Diseño basado en una metodología experimental*, para el servo-sistema hidráulico en estudio.

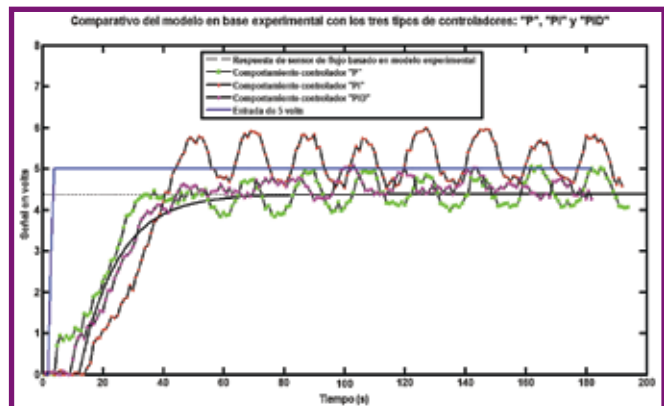


Figura 11. Comparativo de servo-sistema hidráulico con control tipo P, PI y PID. Entrada: 5 volts.

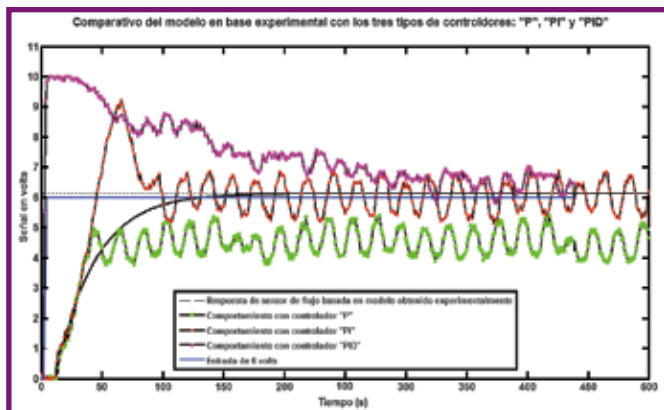


Figura 12. Comparativo de servo-sistema hidráulico con control tipo P, PI y PID. Entrada: 6 volts.

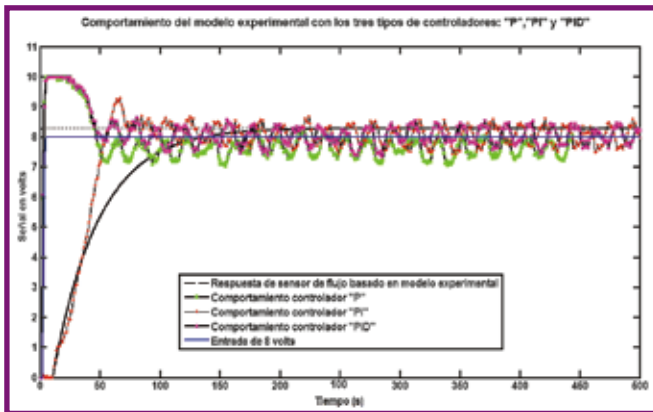


Figura13. Comparativo de servo-sistema hidráulico con control tipo P, PI y PID. Entrada: 8 volts.

Además el experimento arroja que el sistema tiene comportamiento muy lento respondiendo a una apertura de la servo-válvula después de aplicar una señal de 3 volts y en un orden de magnitudes mayores a un minuto para alcanzar su valor final.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los tres diseños obtenidos y con los comportamientos mostrados en las figuras 11, 12 y 13, se puede concluir que lo más recomendable para este caso de estudio y que coincide con la literatura, es implementar un controlador PI o PID, ya que con estos controladores el comportamiento del sistema converge al valor deseado, el error se reduce y se aprecia mayor estabilidad, principalmente en el tipo PID.

En este trabajo se presenta un caso detallado del análisis, diseño e implementación de controladores P, PI y PID. Aunque estas estructuras de control son bien conocidas en la comunidad de control automático, en la literatura se encuentran pocos trabajos que expliquen de manera clara y detallada una metodología para llevar a cabo la implementación de estos controladores. Es de especial interés para la comunidad académica el presentar este trabajo con propósitos educativos con la finalidad de que los estudiantes tanto de licenciatura como de posgrado, obtengan los conocimientos necesarios para dar solución a problemas reales aplicando las técnicas teóricas a sistemas con equipos industriales. Se sabe que dentro de la industria se cuenta con personal en las áreas de ingeniería de procesos e instrumentación que no tienen los fundamentos suficientes acerca de los detalles técnicos involucrados en la construcción del diseño de los algoritmos de los sistemas de control. Con este trabajo se pretende lograr el acercamiento de los estudiantes de los niveles de educación superior, a la práctica en la industria, estableciendo el nexo entre el análisis y diseño de controladores industriales, así como su implementación y puesta en marcha en un sistema real. Adicionalmente, un interés fuerte para desarrollar este trabajo es el de

la puesta en operación de un sistema de control para el laboratorio de control automático de la Universidad de Sonora adscrito al departamento de Ingeniería Industrial.

Como trabajo futuro se obtendrá el diseño del controlador por sintonización basado en el modelo analítico, con la finalidad de evaluar ambas técnicas, estableciendo las ventajas y desventajas entre ellas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Dorf, R.C. y Bishop, R.H. (2005). *Sistemas de Control Moderno* (10^{ma}. Ed.). Madrid, España: Pearson Educación.
- 2) Liu, G., Daley, S. y Duan, G. (2002). Application of optimal-tuning PID control to Industrial hydraulic systems. *15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain*.
- 3) Álamo, T. (2014). Diseño de controlador PID. *Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla*. http://www.esi2.us.es/~alamo/Archivos/Certificaciones/Sec_9_Otras_Publicaciones/Docente/AlamoPIDTotal.pdf (10-03-2014).
- 4) Armstrong, B. y Pérez, R. (2001). Controls Laboratory Program with an Accent on Discovery Learning. *IEEE Control Systems Magazine*. Febrero. 0272-1708/01/\$10.00©2001 IEEE.
- 5) Jelali, M., Kroll, A. (2003). *Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control*. Great Britain: Springer.
- 6) Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control Moderna* (5^{ta}. Ed.). Madrid, España: Pearson Educación.
- 7) Li, Y., Heong A., K. y Chong, G. C. Y. (2006). PID Control System Analysis and Design. Problems, remedies and future directions. *IEEE Control Systems Magazine*. Febrero. Vol. 26 No. 1, pp. 32-41, 120.
- 8) Getting the best out of PID in machine control (1996). *In Digest IEE PG16 Colloquium(96/287)*. Octubre. London, UK.
- 9) Marsh, P. (1998). Turn on, tune in- Where can the PID controller go next. *New Electron*. Vol. 31, No. 4, pp. 31-32.
- 10) Samad, T. y Annaswamy, A. (2011). The Impact of Control Technology: Overview, Success Stories, and Research Challenges. *IEEE Control Systems Society*. Febrero.
- 11) O'Dwyer, A. (2003). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules* (2^{da}. Ed). London: Imperial College Press.
- 12) Xue, D., Chen, Y., Atherton, D.P. (2007). *Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB®*. Philadelphia, PA.: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- 13) ADAM-4022T (2014). *Serial Base Dual Loops PID Controller User's Manual*. <http://amasc.kz/assets/files/files/Advantech/ADAM-4000/ADAM-4022Tpdf> (10/03/2014).
- 14) ADAMView® (2014). *Data Acquisition Software - Datos técnicos disponibles en* http://www.bb-elec.com/Products/Datasheets/ADAMView_ds.pdf. (9-03-2014).

