



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i3.1984>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Practical Aspects of PID Control in Industrial Processes

Aspectos Práticos do Controle PID em Processos Industriais

Jesús Alberto Pérez-Rodríguez ^I

jesus.perez@utm.edu.ec

<http://orcid.org/0000-0002-1578-2565>

Luis Rafael Díaz-Briceño ^{II}

luisdiazspe513@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7667-0233>

Ciaddy Gina Rodríguez-Borges ^{IV}

ciaddy.rodriguez@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1097-4194>

Yolanda Eugenia Llosas-Albuerno ^{III}

yolanda.llosas@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5713-0565>

Lenin Agustín Cuenca-Álava ^V

lenin.cuenca@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5079-9469>

Correspondencia: jesus.perez@utm.edu.ec

***Recibido:** 28 de mayo del 2021 ***Aceptado:** 20 de junio del 2021 *** Publicado:** 01 de julio del 2021

- I. Doctor en Ciencias Mención Instrumentación, Ingeniero Electricista, Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Especialista en Electricidad Mención Control de Procesos Industriales, Ingeniero Electricista, Profesor de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua Federico Brito Figueroa, La Victoria, Venezuela.
- III. Doctor en Ciencias Técnicas, Ingeniero Electricista, Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- IV. Doctor en Ciencias Técnicas, Magister en Gerencia de Empresas Mención: Gerencia Industrial, Ingeniera Industrial, Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- V. Magister en Gerencia Educativa, Ingeniero Eléctrico, Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Resumen

El propósito de esta investigación es presentar una propuesta metodológica para la comunidad académica, en los cuales se obtengan los conocimientos necesarios para aportar solución a problemas reales, mediante una descripción detallada de los aspectos prácticos del control PID en procesos industriales. Es descriptivo, de campo, se tomó como caso de estudio la planta piloto de la UPTA, realizando un levantamiento del funcionamiento del lazo de nivel de líquidos, calibrando los instrumentos de medición y caracterizando el comportamiento dinámico por curvas de reacción, para obtener modelos matemáticos que permitan simular computacionalmente el funcionamiento del proceso a controlar, a partir de allí se estudian las no linealidades y se determinan los parámetros del controlador PID para su posterior implementación, se estudian diferentes escenarios de operación. Esta investigación presenta un caso detallado del análisis, diseño e implementación de controladores PI y PID. Aunque los algoritmos de las acciones de control son bien conocidas y existen muchas literatura de control de procesos, muy pocos de estos trabajos explican de forma clara y detallada una metodología para llevar a cabo la implementación de estos controladores.

Palabras Claves: Control de procesos; PID; nivel de líquido.

Abstract

The purpose of this research is to present a methodological proposal for the academic community, in which the necessary knowledge is obtained to provide a solution to real problems, through a detailed description of the practical aspects of PID control in industrial processes. It is descriptive, in the field, the pilot plant of the UPTA was taken as a case study, carrying out a survey of the operation of the liquid level loop, calibrating the measurement instruments and characterizing the dynamic behavior by reaction curves, to obtain mathematical models that allow to computationally simulate the operation of the process to be controlled, from there the non-linearities are studied and the parameters of the PID controller are determined for its subsequent implementation, different operating scenarios are studied. This research presents a detailed case of the analysis, design and implementation of PI and PID controllers. Although the algorithms of the control actions are well known and there is a lot of process control literature, very few of these works explain in a clear and detailed way a methodology to carry out the implementation of these controllers.

Keywords: Process control; PID; liquid level.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Resumo

O objetivo desta pesquisa é apresentar uma proposta metodológica para a comunidade acadêmica, na qual são obtidos os conhecimentos necessários para solucionar problemas reais, por meio de uma descrição detalhada dos aspectos práticos do controle PID em processos industriais. É descritivo, em campo, a planta piloto da UPTA foi tomada como estudo de caso, realizando um levantamento do funcionamento da malha de nível de líquido, calibrando os instrumentos de medição e caracterizando o comportamento dinâmico por curvas de reação, para obtenção matemática modelos que permitem simular computacionalmente o funcionamento do processo a ser controlado, a partir daí são estudadas as não linearidades e determinados os parâmetros do controlador PID para a sua posterior implementação, são estudados diferentes cenários de funcionamento. Esta pesquisa apresenta um caso detalhado de análise, projeto e implementação de controladores PI e PID. Embora os algoritmos das ações de controle sejam bem conhecidos e haja muita literatura de controle de processos, poucos desses trabalhos explicam de forma clara e detalhada uma metodologia para realizar a implementação desses controladores.

Palavras-chave: Controle de proceso; PID; nível de líquido.

Introducción

Los inicios del control de procesos industriales surgieron alrededor de 1920, con la incorporación de sistemas de control automáticos en calderas de vapor [1]. A partir de la revolución industrial se dio un claro análisis del control y se formularon leyes que hoy en día describimos como control PID [2]. Empresas tales como Fisher, Foxboro, Honeywell entre otras impulsaron grandes desarrollos en al área de control industrial. En la práctica los procesos industriales son sistemas compuestos por tuberías, válvulas, tanques entre muchos otros dispositivos, adicionalmente las acciones de control de control que actúan sobre estos son de gran importancia en el campo para mantener la variable a controlar lo más cercano a valor deseado.

En muchos procesos industriales resulta sumamente complejo la elaboración de un modelo matemático tradicional, por medio del análisis y aplicación de ecuaciones diferenciales, en estos casos es importante conocer las distintas estrategias prácticas que permitan mediante la realización de ensayos, una aproximación razonable, para poner a prueba distintos algoritmos de control, dirigidos

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

a facilitar el diseño y ajuste de los más diversos esquemas de control [3, 4]. Para la realización de modelos propios de los procesos industriales, existen muchas técnicas y procedimientos, probados, y que han demostrado obtener modelos con resultados satisfactorios. En tal sentido se han construido técnicas computacionales que facilitan dicho proceso, disminuyendo los tiempos en la implementación de los mismos, y por consiguiente sus costos [5, 6].

El Ingeniero encargado del diseño y control de sistemas industriales, debe poseer una formación sólida con un componente práctico de indispensable utilidad, en tal sentido se realizan grandes esfuerzos en la generación de equipamiento para la enseñanza en esta área [7, 8, 9], incorporando nuevas técnicas en la enseñanza de dichas metodologías [7, 8, 10], de aquí la importancia de realizar esfuerzos que continuamente se adapten a los nuevos retos de dicho profesional en la industria de hoy [11, 12]. El desarrollo de prácticas de laboratorio de control automático, son fundamentales en la formación para la enseñanza de los profesionales de esta área, con objetivos didácticos y pedagógicos, que reflejen conocimientos y habilidades en los estudiantes [13, 8, 14].

El método de diseño que satisface el tiempo de establecimiento de ajustes de un servo utilizando un controlador PI y un sistema de retroalimentación interno. El sistema de retroalimentación interno consiste en el parámetro modelo del objeto controlado que se aproximó como un sistema de tiempo de retraso de segundo orden. Por lo tanto, se requirió una capacidad de adaptación que contrarreste los parámetros cambiantes del modelo. Los parámetros del objeto controlado se obtuvieron mediante la ejecución en línea de un método de mínimos cuadrados no lineal. La adaptación adecuada por el método desarrollado fue validada en simulación y pruebas experimentales [15].

Es prioritario contar con plataformas auxiliares para la enseñanza de los conceptos matemáticos importantes de la Teoría del Control Automático y la aplicación en procesos físicos, en donde los estudiantes requiere una clara comprensión y asimilación del conocimiento [16]. En este sentido los métodos prácticos son esenciales para la formación y el desarrollo de habilidades y hábitos; incluyen: la ejercitación, la realización de tareas prácticas y los trabajos de laboratorio [17]. En la actualidad las estructuras de control PID son bien conocidas, 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 [18]. El diseño del control procesos, se lleva a cabo con herramientas computacionales que permiten: el modelado, la identificación y la validación de estos modelos, así como a la posterior fase de diseño del controlador propiamente dicho [19].

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Este estudio tiene especial interés en presentar una propuesta metodológica para la comunidad académica, en los cuales se obtengan los conocimientos necesarios para aportar solución a problemas reales, mediante una descripción detallada de los aspectos prácticos del control PID en procesos industriales, explotando el potencial del análisis matemático, para la construcción de modelos de procesos industriales mediante técnicas prácticas basadas en herramientas computacionales, que permitan la aproximación de modelos al comportamiento real, así como, sus técnicas de calibración y algoritmos de control.

Materiales y métodos

Esta investigación plantea una metodología experimental para distintos puntos de operación de un proceso industrial, utilizando modelado matemático, simulación computacional e implementación del sistema de control en una planta piloto, a través del ajuste y calibración de convertidores y transmisores, así como, la sintonización de controladores: P, PI y PID de características comerciales como el AUTONICS modelo TK4L. Para poner en contexto la implementación de los aspectos prácticos del control PID en procesos industriales se tomó como caso de estudio la planta piloto de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua Federico Brito Figueroa (UPTA), más concretamente del laboratorio de control de procesos, la cual se observa en la figura 1.

Figura 1: Laboratorio de control de procesos Planta piloto “A”.



Fuente: Elaboración propia

Este estudio describe en detalle, una serie de pasos a seguir para complementar la formación del Ingeniero de control de procesos, como se visualiza en la figura 2, el punto de partida es la identificación del proceso a controlar, por observación directa del diagrama de tuberías, tanque, válvulas, entre otros; observación directa de las características técnicas de todos los elementos que

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

conforman el proceso, calibración de los instrumentos, elaboración del modelo matemático por medio de curvas de reacción y balances de materia, una vez obtenido el modelo equivalente se pasa a la simulación computacional, para realizar estudios de comportamiento para diferentes puntos de operación y se analizan sus posibles no linealidades, a partir del análisis computacional, se realizan los ajustes de parámetros del controlador PID, con ayuda del computador se estudia el comportamiento del sistema a lazo cerrado a manera de evaluar los valores más adecuados, para realizar la implementación del sistema de control diseñado.

La planta piloto en estudio, cuenta con un arreglo de tuberías que permite elegir entre tres subsistemas autónomos, que se pueden interconectar entre sí, o trabajar por separado, para hacer el control de las variables presión, nivel y caudal; cabe destacar que cada lazo simple cuenta con los transmisores de la variable del proceso y sus válvulas neumáticas como elementos finales de control, así como, convertidores corriente presión (I/P) para manipular cada válvula, adicionalmente se tiene la posibilidad de simular perturbaciones dentro del proceso y así evaluar el comportamiento del mismo, las variables a controlar de presión, nivel y caudal son manipuladas por medio de tres controladores AUTONICS modelo TK4L. La planta piloto bajo estudio cuenta con convertidores I/P marca Foxboro modelo E69-R, estos reciben una señal eléctrica estándar de 4mA a 20mA, internamente este transductor la modifica para tener una salida resultante neumática de 3psi a 15psi; además cuentan con transmisores de presión diferencial Neumático marca Foxboro Modelo 13A y convertidores presión corriente (P/I) Foxboro modelo K4.

Figura 2: Metodología a seguir para implementar el control de un proceso industrial.



Fuente: Elaboración propia

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

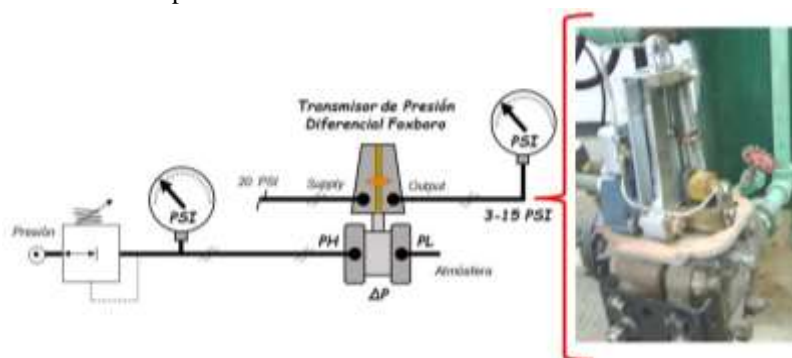
Calibración del transmisor de presión diferencial Modelo 13A

La calibración se realiza con el tornillo de cero y la rueda de rango como se muestra en la figura 3, el tornillo de cero simplemente añade tensión a la parte inferior de la barra de rango, tirando de él en una dirección tal como para colapsar el fuelle, este se gira en sentido horario; esta acción empuja el deflector más cercano a la boquilla y tiende a aumentar la presión de aire al fuelle. Si un técnico hace girar la rueda de rango, la relación de palanca de la barra cambia, afectando la proporción de la fuerza [20, 21, 22].

Procedimiento:

- I. Aplicar el 100% del ΔP de entrada en la toma de alta presión, ajustar la rueda de rango hasta que la salida sea 15 PSI.
- II. Aplicar el 50% del ΔP de entrada en la toma de alta presión, verifique la salida en 9 PSI, si el error es mayor al $\pm 2\%$, se debe ajustar el tornillo de cero hasta que calibre 9 PSI (50%).
- III. Aplicar nuevamente el 100% del ΔP de entrada y verifique la salida en 15 PSI. Si la salida no es correcta, repita los pasos anteriores.
- IV. Inyectar una presión por la toma de alta, PH=14,7 PSI para igualar a la presión atmosférica, tal que $\Delta P=0$, ajuste el tornillo de cero hasta que la salida sea 3 PSI. Si la salida no es correcta, repita los pasos anteriores.
- V. Calibrado el transmisor, realizar un barrido de la señal de entrada con respecto a la de salida.

Figura 3: Conexión para la Calibración de Transmisor de Presión diferencial modelo 13^a.



Fuente: Elaboración propia

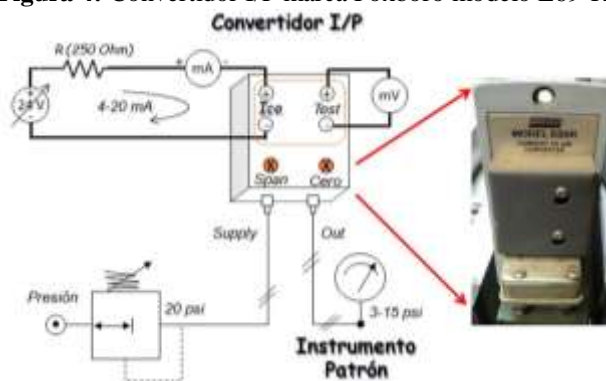
Calibración del I/P marca Foxboro modelo E69-R

Procedimiento práctico para la calibración para un convertidor I/P, con entrada de 4 a 20 mA y salida de 3 a 15 PSI [23].

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

- I. Aplicar 12mA (50%) a la entrada del convertidor y ajuste la salida (con el tornillo de ajuste cero) a 9 PSI (50%)
- II. Aplicar 20mA a la entrada del convertidor y verifique el error, ¿está por encima o por debajo 15 PSI de salida?
- III. Girar el fuelle moviendo la línea de referencia hacia el motor para disminuir el Span o alejándola del motor para aumentar el Span hasta que el error esté dentro del $\pm 2 \%$. (una vuelta del tornillo de ajuste de Span corregirá el error aproximadamente en 3%)
- IV. Aplicar 12mA (50%) a la entrada del convertidor y ajuste la salida (con el tornillo de ajuste cero) a 9 PSI (50%)
- V. Aplicar 20mA (100%) a la entrada y verifique la salida igual a 15 PSI (100%). Si la salida no es correcta, repita los pasos anteriores.
- VI. Aplicar 4 mA (0%) y verifique la salida igual a 3 PSI (0%), si es necesario reajuste el tornillo de cero para una salida correcta.
- VII. Aplicar 100% de entrada y verificar la salida. Si la salida no es correcta, repita los pasos anteriores hasta que ambas salidas (0% y 100%) sean correctas.
- VIII. Calibrado el I/P, realizar un barrido de la señal de entrada con respecto a la de salida, para verificar la calibración realizada.

Figura 4: Convertidor I/P marca Foxboro modelo E69-R.



Fuente: Elaboración propia

Método de identificación del proceso

En un sistema de control es importante contar con un modelo que represente el proceso a controlar [24]. La respuesta temporal de un proceso industrial, se divide en transitoria y de régimen permanente

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

[25]. Donde $y_h(t)$ es el comportamiento desde el estado inicial hasta el estado final, depende de las condiciones iniciales del sistema, $y_p(t)$ representa el comportamiento de la salida para un tiempo muy grande, permaneciendo después de la respuesta transitoria.

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t) \quad (1)$$

Existen varios métodos para la determinación de los parámetros de un proceso industrial, los cuales pueden requerir el trazo de una recta tangente en el punto de inflexión de la curva, la determinación del instante en que este punto ocurre, la determinación de los tiempos para que la respuesta alcance dos o tres puntos porcentuales determinados del cambio total de la respuesta, o el cálculo de áreas definidas por las curvas de las señales de entrada y salida [26]. Todo sistema lineal de orden superior se puede comportar aproximadamente a un modelo equivalente de primer orden más tiempo muerto (POMTM) o de segundo orden más tiempo muerto (SOMTM) [27].

Los sistemas Industriales tienen diferentes tanques para acumular, almacenar o mezclar diferentes materiales, es de suma importancia estudiar y emular el comportamiento dinámico de procesos de Nivel de líquido en el tanque, con respecto a los cambios en el flujo de entrada $Q_i(t)$ y a los cambios de la posición de abertura de la válvula de salida $V_p(t)$. La función de transferencia del proceso de nivel puede ser determinada a partir de la ley de conservación de masa [28]. Implica que, la tasa de flujo másico del líquido de entrada, menos la tasa de flujo másico de líquido que sale del tanque, es igual a la masa acumulada [29]. En el caso de estudio no hay cambios en la densidad del fluido, se supone constante, se tiene:

$$q_{i(t)} - q_{o(t)} = \dot{m}_a \quad (2)$$

$$\rho \cdot q_{i(t)} - \rho \cdot q_{o(t)} = \frac{d}{dt}(\rho \cdot A \cdot h_{(t)}) \quad (3)$$

$$q_{i(t)} - q_{o(t)} = A \cdot \frac{d}{dt}(h_{(t)}) \quad (4)$$

Donde

ρ = Densidad de masa del líquido

$q_{i(t)}$ = flujo del líquido de entrada

$q_{o(t)}$ = flujo del líquido de salida

$h_{(t)}$ = Nivel del líquido en el tanque

A = Área del tanque

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Método de Sintonización del controlador

La operación adecuada de un proceso industrial, requiere la puesta punto del sistema por medio de la sintonización del controlador [30]. Se han realizado muchos estudios en relación a los criterios para la sintonización de los controladores, la acción de control PID, ofrece simpleza pero a su vez es débil dado que hay plantas que no se pueden estabilizar mediante este método así que limita su rango [31]. Los métodos de sintonización son clásicos, en la tabla 1 observamos los coeficientes para sintonización de controladores, resaltando Ziegler y Nichols, Cohen-Coon [32, 33, 34, 35]

$$G_{planta(s)} \approx \frac{k}{(\tau \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_m \cdot s} \quad (5)$$

Donde

k = Ganancia en Régimen permanente

τ = Constante de Tiempo

t_m = Tiempo muerto

Tabla 1: Ecuaciones de cálculo de coeficientes para sintonización de controladores por el método de Ziegler-Nichols (curva de reacción) y Cohen-Coon.

	Ziegler-Nichols (curva de reacción)			Cohen-Coon		
Tipo de controlador	K_p	t_i	t_d	K_p	t_i	t_d
P	$\frac{\tau}{k \cdot t_m}$	∞	0	$\left(\frac{\tau}{k \cdot t_m}\right) \left(1 + \frac{t_m}{3\tau}\right)$	∞	0
PI	$0,9 \cdot \frac{\tau}{k \cdot t_m}$	$3 \cdot t_m$	0	$\left(\frac{\tau}{k \cdot t_m}\right) \left(\frac{9}{10} + \frac{t_m}{12\tau}\right)$	$\left(\frac{30\tau + 3t_m}{9\tau + 20t_m}\right) \cdot t_m$	0
PID	$1,2 \cdot \frac{\tau}{k \cdot t_m}$	$2 \cdot t_m$	$0,5 \cdot t_m$	$\left(\frac{\tau}{k \cdot t_m}\right) \left(\frac{4}{3} + \frac{t_m}{4\tau}\right)$	$\left(\frac{32\tau + 6t_m}{13\tau + 8t_m}\right) \cdot t_m$	$\left(\frac{4\tau}{11\tau + 2t_m}\right) \cdot t_m$

Fuente: modificado de Ogata, Ingeniería de Control Moderna 2021.

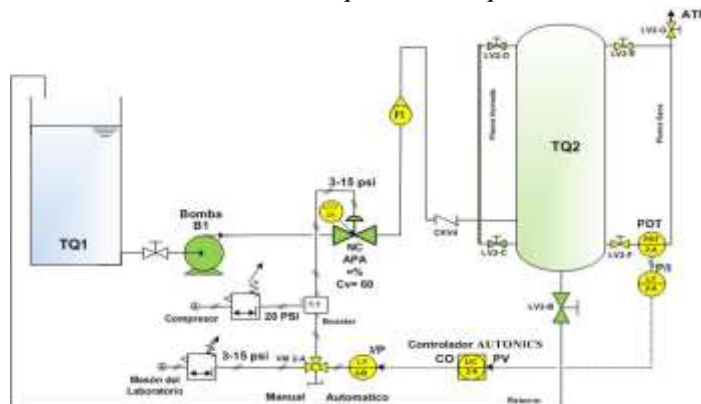
Resultados

Siguiendo la metodología planteada para la implementación práctica del control PID en procesos industriales, mostrada en la figura 2, seleccionamos el lazo de nivel de líquidos de la planta piloto caso de estudio, cuyo diagrama de tuberías se observa en la figura 5, está compuesto por un el tanque cilíndrico con un radio de 15 cm; el flujo nominal de entrada y de salida del tanque es de $Q_i=7,75$ gpm; el fluido utilizado es agua cuya densidad $\rho=1000$ kg/m³ ; el nivel en estado estacionario es de 30 "H₂O, la válvula de salida es lineal con un $[V_p]_2=0,5$ y $C_v=14,876$ gpm/ $\sqrt{\text{psi}}$ y su fluido está saliendo a la atmósfera. La medición de nivel se realiza por medio de un transmisor de presión diferencial neumático Foxboro modelo 13A, calibrado en un rango de 0 a 60 "H₂O. La altura del

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

líquido dentro del tanque TQ2, depende de la posición de la válvula de salida LV2B y del caudal de entrada manipulado por el elemento final de control LCV2A, es una válvulas normalmente cerrada NC de característica isoporcentual ($=\%$) no lineal, los cambios del caudal son proporcional a la posición del vástago para $V_p = \alpha^{(x-1)}$.

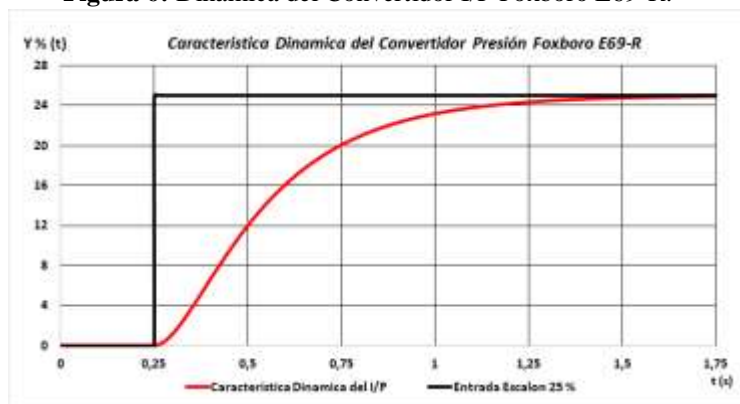
Figura 5: Diagrama de tuberías Proceso de Nivel de líquidos en tanques Planta Piloto. Fuente: Elaboración propia



Se calibra el convertido I/P marca Foxboro modelo E69-R, para el rango completo de 4 a 20 mA, posteriormente se determina el comportamiento dinámico provocando un cambio brusco en la corriente de entrada que puede ser de un 25 % de su valor final (8 mA), y se tomó registro de la presión de salida en el tiempo como se muestra en la figura 6. La respuesta estática del I/P corresponde a la ecuación 6, el modelo dinámico se muestra en la tabla 2.

$$P_{out} (psi) = \frac{12}{16} \cdot I_{(mA)} \quad (6)$$

Figura 6: Dinámica del Convertidor I/P Foxboro E69-R.



Fuente: Elaboración propia

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Tabla 2: Modelos Matemáticos propuestos para la dinámica del Convertidor I/P Foxboro E69-R.

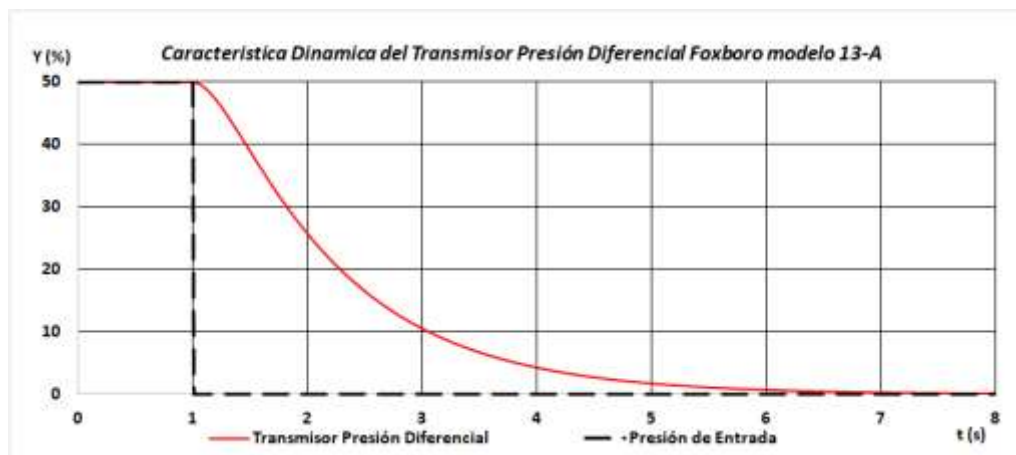
Fuente: El Autor (2021)

Métodos		$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$	$t_m(s)$	Modelo del Convertidor I/P
Primer Orden más tiempo muerto	POMTM	0,27027	0	0,0662	$G_{Ip(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,0662 \cdot s}}{(0,27027 \cdot S + 1)}$
Polo doble más tiempo muerto	PDMTM	0,17725	0,17725	-0,03226 NEGATIVO	$G_{Ip(s)} = \frac{1}{(0,17725 \cdot S + 1)^2}$
Segundo orden más tiempo muerto	SOMTM	0,24	0,085533	0,003811	$G_{Ip(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,003811 \cdot s}}{(0,24 \cdot S + 1)(0,085533 \cdot S + 1)}$
Segundo orden	SO	0,24	0,085533	≈ 0	$G_{Ip(s)} = \frac{48,7145}{(S + 4,1667)(S + 11,691394)}$

Se debe calibrar el Transmisor Presión Diferencial Neumático Foxboro Modelo 13A1, para un rango de $\Delta P = 0$ a 55,36 "H₂O equivalente a la altura del tanque, cuya característica estática corresponde con la expresión 7, para determinar la dinámica se debe ajustar 27,68 "H₂O, correspondiente al 50% de la variable, provocar un cambio brusco de forma inversa quitándole presión de entrada y registrando la variación de la presión de salida en el tiempo, el modelo dinámico se muestra en la tabla 3.

$$P_{(PSI)} = \left(\frac{12}{55,36}\right) \cdot (\Delta P_{med(H_2O)}) + 3 \quad (7)$$

Figura 7: Dinámica del Transmisor de Presión diferencial Foxboro 13ª.



Fuente: Elaboración propia

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Tabla 3: Modelos Matemáticos propuestos para la dinámica del Transmisor de Presión diferencial Foxboro 13^a.

Métodos		$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$	$t_m(s)$	Modelo Transmisor Foxboro 13A
Primer Orden más tiempo muerto	POMTM	1,14867362	0	0,2226553	$G_{PDT(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,2226553 \cdot s}}{(1,14867362 \cdot S + 1)}$
Polo doble más tiempo muerto	PDMTM	0,76524971	0,76524971	-0,217753 NEGATIVO	$G_{PDT(s)} = \frac{1}{(0,76524971 \cdot S + 1)^2}$
Segundo orden más tiempo muerto	SOMTM	1,122896121	0,219484514	0,0132955	$G_{PDT(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,0132955 \cdot s}}{(1,122896121 \cdot S + 1)(0,219484514 \cdot S + 1)}$

Fuente: Elaboración propia

El convertidor de Presión a corriente Foxboro, recibe una señal de entrada de presión y su señal de salida es de 4 a 20 mA, correspondiente en la corriente actual leída [29]. Se puede estimar la salida por medio de expresión 8, además este convertidor electrónico cuenta con una respuesta dinámica mostrada en la tabla 4.

$$I_{(mA)} = \left(\frac{16}{40}\right) \cdot P_{med(PSI)} + 4 \quad (8)$$

Tabla 4: Modelos Matemáticos propuestos para la dinámica del Convertidor de Presión a corriente Foxboro.

Métodos		$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$	$t_m(s)$	Modelo del Convertidor P/I
Primer Orden más tiempo muerto	POMTM	0,152270	0	0,03483	$G_{PT(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,03483 \cdot s}}{(0,15227 \cdot S + 1)}$
Polo doble más tiempo muerto	PDMTM	0,100207	0,100207	-0,021261 NEGATIVO	$G_{PT(s)} = \frac{1}{(0,100207 \cdot S + 1)^2}$
Segundo orden más tiempo muerto	SOMTM	0,1390259	0,0428753	0,00172469	$G_{PT(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,00172469 \cdot s}}{(0,1390259 \cdot S + 1)(0,0428753 \cdot S + 1)}$

Fuente: Elaboración propia

Sistema Tanque-Válvula en el Proceso de Nivel

A partir de la ley de conservación de masa, presentada en la expresión 4, y los parámetros propios del sistema de nivel, donde el caudal de salida $q_o(t)$ es manipulado por la válvula LV2B, y depende la altura del líquido acumulado en el tanque y la posición del vástago $[[V_p]]_2(t)$ se obtiene la expresión 9. Al sustituir está en la expresión 4, nos queda la expresión 10, correspondiente al funcionamiento dinámico del sistema de nivel estudiado. Para analizar la respuesta dinámica es necesario aplicar transformada de Laplace [36]. Por lo que se alcanza la expresión 11.

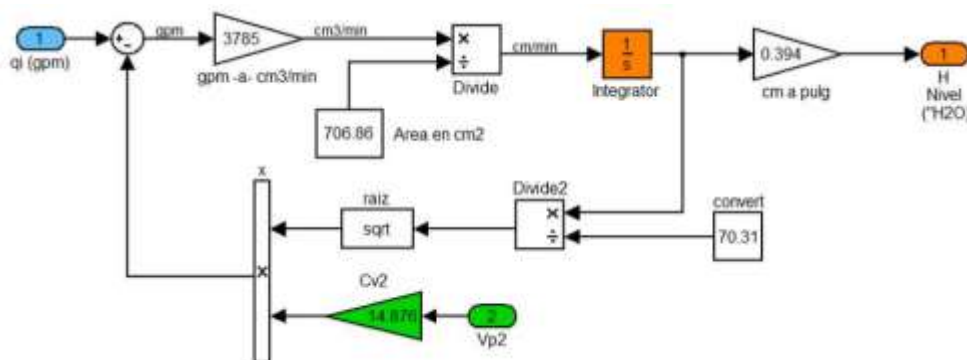
Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

$$q_o(t) = C_{v2} \cdot Vp_2(t) \cdot \sqrt{\frac{h(cm)}{70,31}} \quad (9)$$

$$q_i(t) - C_{v2} \cdot Vp_2(t) \cdot \sqrt{\frac{h(cm)}{70,31}} = A \cdot \frac{d}{dt}(h(t)) \quad (10)$$

$$h(s) = \frac{3785 \cdot [q_i(t) - C_{v2} \cdot Vp_2(t) \cdot \sqrt{\frac{h(cm)}{70,31}}]}{A} \cdot \frac{1}{s} \quad (11)$$

Figura 8: Diagrama de bloques del tanque para el proceso de nivel.



Fuente: Elaboración propia

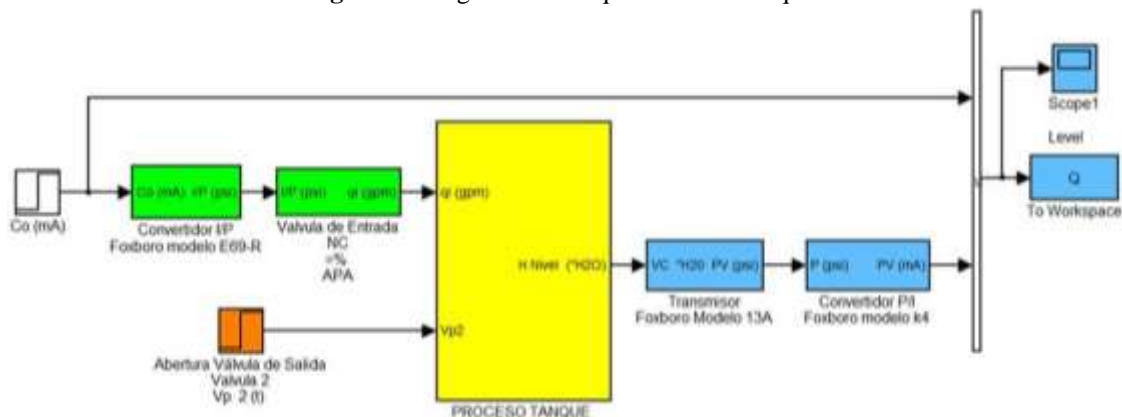
El caudal de entrada $q_i(t)$, es manipulado por una válvula isoporcentual normalmente cerrada, esta genera efectos no lineales en la controlabilidad del proceso [37]. Las no linealidades dependen del radicando en la expresión del caudal y la característica intrínseca de la válvula para la posición del vástago $V_p = \alpha^{x-1}$ donde x es el desplazamiento del vástago y α es la rangeabilidad.

$$q_i(t) = C_{v1} \cdot Vp_1(t) \cdot \sqrt{P_{1(Q)} - 2,53} \quad (12)$$

La figura 9 muestra el diagrama de bloques del proceso de nivel tanque-válvula, representando el modelo matemático calculado y usado en la simulación computacional, para realizar el estudio de la dinámica conjunta y las no linealidades del proceso, se eligió una entrada correspondiente al 25%, 50% y 75% de abertura de la válvula. En la figura 10, para una entrada del 50% se ajustó a 12 mA en el convertidor I/P, el tanque alcanza 30 "H2O en estado estacionario, equivalente a una variable de proceso (PV) de 12 mA; con un 25% de entrada, la salida alcanza 3,75 "H2O (5mA), y con un 75% de entrada, la salida queda saturada 60"H2O (20 mA).

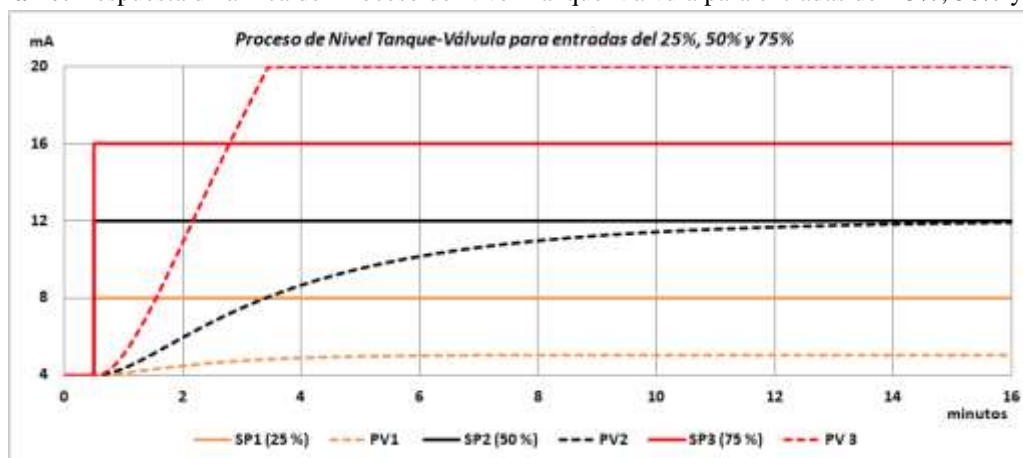
Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Figura 9: Diagrama de bloques de nivel tanque-válvula.



Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Respuesta dinámica del Proceso de Nivel Tanque-Válvula para entradas del 25%, 50% y 75%.



Fuente: Elaboración propia

En virtud que el sistema a controlar es no lineal como se puede observar en la figura 10, se tomo el 50% de la variable de salida 30 "H₂O, como condición de borde para estudiar el comportamiento dinámico de la respuesta del proceso tanque válvula, encontrando modelos equivalentes de 1er, 2do y 3er orden, correspondiente al proceso de la figura 9 en el punto de operación seleccionado, el modelo dinámico mostrado en la tabla 5, es la base para calcular los parámetros de sintonía del controlador PID modelo ISA ideal por el método de Ziegler y Nichols y Cohen-Coon. A partir de la tabla 1 se procede a determinar los coeficientes de la acción de control PID, como se muestra en la tabla 6.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Tabla 5: Modelos Matemáticos equivalente para el Proceso de Nivel Tanque Válvula.

Métodos	Modelo Proceso de Nivel Tanque Válvula
1er Orden	$G_{Tq-val(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,55193834544413 \cdot s}}{(3,35985757075863 \cdot s + 1)}$
2do Orden	$G_{Tq-val(s)} = \frac{1 \cdot e^{-0,0384602951149255 \cdot s}}{(3,2793122568409 \cdot s + 1)(0,537365484006198 \cdot s + 1)}$
3er Orden	$G_{Tq-val(s)} = \frac{2}{(3,2793122568409 \cdot s + 1)(0,537365484006198 \cdot s + 1)(0,0384602951149255 \cdot s + 2)}$

Fuente: Elaboración propia

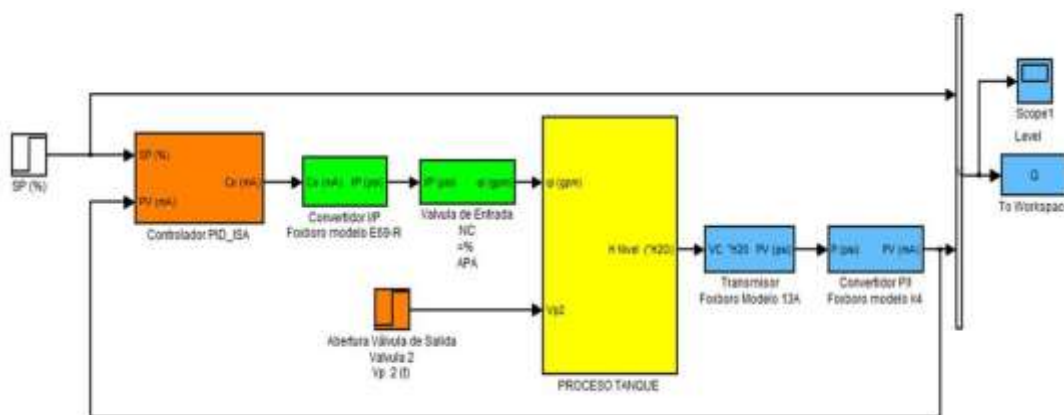
Tabla 6: Parámetros de sintonización del controlador PID.

Valores de sintonización del controlador PID ideal						
Tipo de Controlador	Método de Ziegler y Nichols			Método de Cohen-Coon		
Parámetro	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td
PID	7,31973659	1,10387669	0,27596917	8,38354999	1,27188734	0,19488404
PI	5,47864057397487	1,65581503633239	0	5,561973907	1,36992199512322	0

Fuente: El Autor (2021)

Antes de realizar la implementación del control diseñado, se efectúa una simulación computacional del sistema de control a lazo cerrado (ver figura 11), con miras a verificar y evaluar el comportamiento de cada método de sintonización del controlador. El caso de estudio es una planta con respuesta sobre amortiguada, en la cual se pueden aplicar controles PI y PID, siendo estos los más comunes en el campo industrial, dado que corrigen el error en estado estacionario, son adecuados para procesos con dinámicas de primer orden más tiempo muerto, tienden a ser recomendado para tanques simples, reactores, entre otros. Se utilizó la herramienta Simulink® de MATLAB® para realizar la simulación del sistema realimentado.

Figura 11. Diagrama de bloques del lazo cerrado de control del Proceso de Nivel Tanque-Válvula.

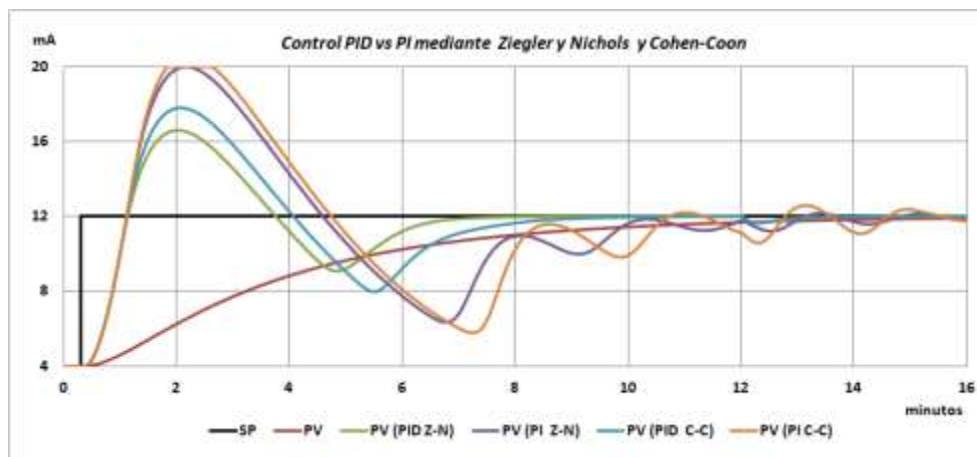


Fuente: Elaboración propia

Estudio comparativo

El análisis computacional por medio de la simulación, arroja como resultado que la acción de control PI, en la figura 12 se observa que la salida produce un pico muy elevado, alrededor del 67% del valor final, provocando múltiples oscilaciones antes de llegar a corregir el error en estado estacionario. La acción de control PID corrige el error en estado estacionario en la mitad del tiempo de asentamiento de la respuesta de la planta en lazo abierto, sin embargo se obtiene un sobre pico del 38% para el método de Ziegler y Nichols y un 48% para el método de Cohen-Coon. En virtud que la planta estudiada tiene una dinámica no lineal, compleja, en donde los parámetros de ajuste del controlador tienen un rango limitado de trabajo, lo que trae como consecuencia que no es un diseño de control adecuado para una planta no lineal.

Figura 12: Respuesta del control PID vs PI mediante Ziegler y Nichols y Cohen-Coon del Proceso de Nivel Tanque-Válvula.



Fuente: Elaboración propia

A partir de la evaluación anterior, es necesario realizar una modificación de los parámetros del controlador PID mediante un ajuste fino a las ecuaciones de Ziegler y Nichols. Para esto se debe acercar el cero del controlador PID hacia el origen del plano, en un factor de 2,19 así como aumentar la ganancia en el mismo factor. La expresión 13 representa la función de transferencia del controlador PID ISA,

$$G_{(PID,ISA)} = K_p \left(1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right) \quad (13)$$

$$G_{(PID,ISA)} = 7,31973659 \left(1 + \frac{1}{1,10387669 \cdot s} + 0,27596917 \cdot s \right) = 2,02002163136093 \frac{(s+1,81196903)^2}{s} \quad (14)$$

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

Al aplicar el método de ajuste fino propuesto, se divide la raíz del cero doble en 2,19, aumentando la ganancia en el mismo factor, de tal forma se encuentran nuevos valores para los parámetros del controlador PID mostrados en la tabla 7.

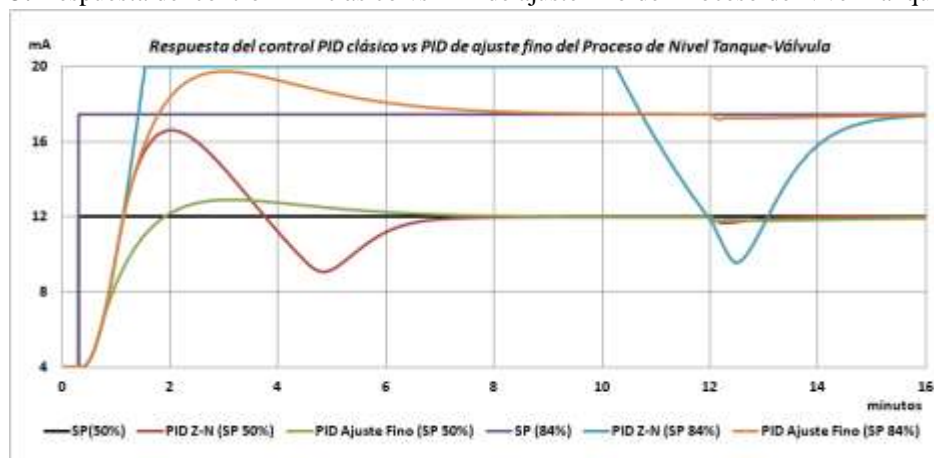
Tabla 7: Parámetros de sintonización del controlador PID con ajuste fino.

Valores del controlador PID con ajuste fino			
Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
PID Ziegler y Nichols	7,31973659	1,10387669	0,27596917
PID (ajuste fino)	7,31973659	2,4174899292	0,6043724823

Fuente: Elaboración propia

En la figura 13 se tiene la respuesta del controlador PID clásico en contraste al modificado por medio de un ajuste fino, para una referencia (SP) del 84% el PID clásico supera la condición de borde, lo cual indica que supera los límites de controlabilidad del sistema, mientras que con los parámetros del ajuste fino se lleva suavemente al valor deseado, sin superar la condición de borde del tanque de nivel, además se reduce el sobre pico a un 25% del valor final.

Figura 13: Respuesta del control PID clásico vs PID de ajuste fino del Proceso de Nivel Tanque-Válvula.



Fuente: Elaboración propia

En virtud de que el algoritmo PID modelo ISA, obtuvo una mejor controlabilidad de proceso, se procedió a verificar diferentes puntos de ajuste para lo cual se evaluó el comportamiento con una excitación de un SP de 12,5%, 50% y 84%, en todos los casos el sobre pico de la variable de salida disminuye, en la práctica se recomienda realizar un ajuste fino en los parámetros del controlador PID,

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

dicha modificación produce mejoras significativas en los procesos ante cambios del punto de consigna, atenuando las perturbaciones y conservando la misma simplicidad del modelo PID. Desde el punto de vista práctico, la mayoría de los procesos industriales pueden controlados moderadamente bien con la acción de control PID, siempre y cuando las condiciones de funcionamiento no sean demasiado exigentes, es decir, si el proceso tiene perturbaciones complejas el modelo PID tiene ciertas limitaciones.

Discusión

Los descubrimientos empíricos demuestran que la estructura del PID por lo general tiene la suficiente flexibilidad como para alcanzar excelentes resultados. Al estudiar la capacidad de controlabilidad del algoritmo de control PID sobre el Proceso de Nivel Tanque-Válvula de la planta piloto estudiada, podemos afirmar que las características de la capacidad de control resultante iguala las particularidades del proceso solo para el escenario de operación en el momento en que se ajustó el controlador.

Al observar las respuestas dinámicas de la planta estudiada, las características del proceso cambian con las condiciones de operación del mismo, es un sistema no lineal, la sintonización del controlador PID que ofreció un rendimiento aceptable casi para todo el rango de operación, es por medio del ajuste fino de los parámetros del controlador de Ziegler–Nichols, en virtud a que este logra proporcionar un rendimiento más uniforme, en múltiples condiciones de operación deseadas.

Esta investigación presenta un caso detallado del análisis, diseño e implementación de controladores PI y PID. Aunque los algoritmos de las acciones de control son bien conocidas y existen muchas literatura de control de procesos, muy pocos de estos trabajos explican de forma clara y detallada una metodología para llevar a cabo la implementación de estos controladores.

Referencias

1. S. Bennett, «History of Automatic Control to 1960: an overview,» Department of Automatic Control & Systems Engineering, The University of Sheffield Mappin Street, Sheffield S1 3m, UK, email: s.bennett@Sheffield.ac.uk, 1996.
2. R. P. Moreno, «Evolución histórica de la ingeniería de control,» 1999. [En línea]. Available: <http://automata.cps.unizar.es/regulacionautomatica/historia.PDF>.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

3. L. Braccia, «"Integración entre diseño y control de procesos industriales," Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario,» 2019. [En línea]. Available: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/81214>.
4. H. Garnier, «"Direct continuous-time approaches to system identification. Overview and benefits for practical applications," European Journal of control, vol. 24, pp. 50-62,» 2015. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejcon.2015.04.003>.
5. J. A. R. Urrego and N. L. P. Restrepo, «"Aplicación de diseño, simulación, identificación de sistemas e implementación de controladores PID-Digitrol," Revista Politécnica, vol. 12, no. 23, pp. 27-37,» 2016. [En línea]. Available: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/896>.
6. D. Valério and J. S. Da Costa, «"Tuning of fractional PID controllers with Ziegler–Nichols-type rules," Signal processing, vol. 86, no. 10, pp. 2771-2784,» 2006. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2006.02.020>.
7. C. G. Rodriguez -Borges, J. A. Perez-Rodriguez, E. D. Lituma Ramirez, A. B. Perez-Baltar, «Software Development for Transformer Model Supporting Significant Learning Electrical Machines,» International Journal of Psychosocial Rehabilitation, vol. 24, n° 2, 2020.
8. J. A. Pérez-Rodríguez, C. G. Rodriguez Borges, A. V. Pérez, C. A. Bowen, «Emulation of System as Strategy for Teaching of Mechanical System,» International Journal of Psychosocial Rehabilitation, vol. 24, n° 6, 2020.
9. Y.S. Gonzalez, E. Dunia, J.A. Pérez-Rodríguez, «Prototipo didáctico para el aprendizaje de la mecánica en los laboratorios de física universitaria mediante un sistema de adquisición y procesamiento de datos,» Revista Educación en Ingeniería, vol. 12, n° 24, pp. 9-14, 2017.
10. J.A. Pérez-Rodríguez, C.G. Rodriguez-Borges, M. Rodriguez ,C. Villacreces , «Espacios maker: herramienta motivacional para estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica de Manabí, Ecuador,» Revista Espacios, vol. 41, n° 2, p. 12, 2020.
11. S. M. Charre-Ibarra, J. A. Alcalá-Rodríguez, N. López-Luiz, and M. A. Durán-Fonseca, «"Sistema didáctico de control de presión," Formación universitaria, vol. 7, no. 5, pp. 33-40,» 2014. [En línea]. Available: doi: 10.4067/S0718-50062014000500005.
12. A. Simmonds-Mendoza, N. Cabrera-Londoño, N. Berdugo-Barandica, J. Roldán-Mckinley, and E. Yime-Rodríguez, «"Implementación de control PID de nivel en laboratorio usando

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

- PLC Siemens S7-300," Revista UIS Ingenierías, vol. 17, no. 2, pp. 159-178,» 2018. [En línea]. Available: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/6290/8185>.
13. J. L. Benavides Maldonado, G. R. Riofrío Cruz y D. E. Jara Delgado, «Herramientas del docente para enseñar control automático a través de prácticas de trituración de cobre,» ARJÉ. Revista de Postgrado FaCE-UC, vol. 12, n° 22, pp. 465-472, 2018.
 14. C. G. Rodríguez-Borges, C. A. Bowen-Quiroz, J. A. Pérez-Rodríguez, «Evaluación de las capacidades de aprendizaje colaborativo adquiridas mediante el proyecto integrador de saberes,» Formación universitaria, vol. 13, n° 6, pp. 239-246, 2020.
 15. T. Takiyama, Yoshikawa, T., Noh, J., & Ohta, Y., «PI and Adaptive Model Matching Control System that Satisfies the Setting Settling Time application to engine speed control.,» IFAC-PapersOnLine, vol. 51, n° 4, pp. 394-399, 2018.
 16. A. Méndez Navarro, «Enseñanza del Controlador PID Digital en un Microcontrolador ATMEGA48 para una Planta RC de Primer Orden,» Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, Departamento de Ingeniería Electrónica, 11° Congreso Nacional de Mecatrónica, ISBN: 978-607-95347-7-6., 2012.
 17. B. M. Seijo Echevarría, N. Iglesias Morel, M. Hernández González y C. R. Hidalgo García, «Métodos y formas de organización del proceso de enseñanza aprendizaje. Sus potencialidades educativas. Rev Hum Med v.10 n.2 Ciudad de Camaguey,» 2010. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-81202010000200009.
 18. M. E. Anaya Pérez, V. H. Benítez Baltazar, J. H. Pacheco Ramírez y F. Montaña Valle, «Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental,» 2020. [En línea]. Available: <https://biblat.unam.mx/hevila/EpistemusCienciatecnologiaysalud/2014/no16/2.pdf>.
 19. F. Vázquez Serrano, «Entorno Matlab para diseño de controladores PID,» 2013. [En línea]. Available: http://www.dia.uned.es/~fmorilla/Web_FMorilla_Julio_2013/Herramientas/2000_SISO_JA00.pdf.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

20. D. A. y. systems, «Manual de instrucciones universal Transmisores de presión,» 2000. [En línea]. Available: https://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/MI%20020-359%20Transmisores.pdf.
21. Foxboro, «I/A Series Pressure Transmitters, IDP10 Differential Pressure with 4 to 20 mA Output Signal, Installation, Operation, Calibration, Configuration, and Maintenance, MI IDP10-A,» 2007.
22. O. M. Quintero Arango, «Protocolo técnico para mantenimiento de transmisores de presión, nivel, temperatura y válvulas tipo mariposa y globo, Universidad Tecnológica de Pereira - UTP,» 2011. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/71398106.pdf>.
23. Foxboro, «Model E69F Current-to-Pneumatic Signal Converter,» <https://www.nexinstrument.com/assets/images/pdf/E69F.pdf>, 2020.
24. V. M. Alfaro Ruiz, «Evaluación de los modelos utilizados en los estudios del control PID,» Ciencia y Tecnología, vol. 2, n° 24, pp. 117-129, ISSN: 1409-2441, 2007.
25. M. S. Charles K. Alexander, Fundamentos de circuitos eléctricos, 6th Edición, McGraw-Hill, 2018.
26. V. M. Alfaro Ruiz, «Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso,» Ciencia y Tecnología, vol. 24, n° 2, pp. 197-216, ISSN: 0378-0524, 2006.
27. C. A. Smith y A. B. Corripio, Principles and Practice of Automatic Process Control, 3rd Edition, ISBN: 978-0-471-43190-9, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
28. H. D. Álvarez Zapata, Balances de materia y energía. Formulación, solución y usos en procesos industriales, Medellín: Artbox, 2011.
29. B. T. R. Kuphaldt, Lessons In Industrial Instrumentation, Creative Commons Attribution 4.0 International Public License, https://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic/sinst/book/liii_2v32.pdf, 2019.
30. O. Arrieta Orozco y V. M. Alfaro Ruiz, «Sintonización de controladores PI y PID utilizando los criterios integrales IAE e ITAE,» Ingeniería, vol. 13, n° 1-2, pp. 31-39, DOI:10.15517/ring.v13i1-2.618, 2003.
31. V. Mazzone, «Controladores PID,» 2018. [En línea]. Available: <https://controlautomaticomazzone.files.wordpress.com/2018/03/pid.pdf>.

Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales

32. J. a. N. N. B. Ziegler, «Process lags in automatic control circuits,» Trans. American Society of Mechanical Engineers, n° 65, pp. 433-444, 1943.
33. K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall Internacional, 1980.
34. B. Kuo, Sistemas de control automático, 7 edition, Prentice Hall Hispanoamericana , 1996.
35. R. Hernández Gaviño, Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB, Prentice Hall, 2010.
36. H. Lázaro M., G. Melgarejo, E. Montoro, J. Obregón, J. Diego y V. Aramburú R., «Aplicación de la transformada de Laplace a circuitos eléctricos,» Instituto de investigación, FIGMMG-UNMSM, vol. 19, n° 38, pp. 43-46, 2016.
37. A. A. Ishak y M. A. Hussain, «Effect of valve characteristics to the controllability of ph in a continuous stirred tank reactor,» Regional Symposium on Chemical Engineering, pp. 1693-1699, <https://aabi.tripod.com/notes/effectvalve.pdf>, 2002.
38. M. F. Alcívar-Vélez, C. G. Rodríguez-Borges, «La gestión ambiental una propuesta de planificación en cooperativas de ahorro y crédito,» polo del Conocimiento, vol. 6, n° 3, pp. 569-590, 2021.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).