

# **Análisis comparativo entre un Método Experimental vs uno Analítico, de Diseño de Controladores tipo P, PI y PID para un Sistema de Proceso Industrial**

***M.C. María Elena Anaya Pérez***

Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n Colonia Centro. C.P. 83000, Hermosillo Sonora

Teléfono: (662)2592160

*meanaya@industrial.uson.mx*

***Dr. Victor Hugo Benítez Baltazar***

Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n Colonia Centro. C.P. 83000, Hermosillo Sonora

Teléfono: (662)2592160

*vbenitez@industrial.uson.mx*

***M.C. Jesús Horacio Pacheco Ramírez***

Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n Colonia Centro. C.P. 83000, Hermosillo Sonora

Teléfono: (662)2592160

*jpacheco@industrial.uson.mx*

## **Resumen**

La información presentada en este artículo es parte del resultado de un trabajo de investigación sobre la puesta en operación de un sistema de entrenamiento de control de procesos y evaluación de controladores industriales, en el cual se realiza un análisis entre dos métodos de diseño de controladores P, PI y PID para un sistema de planta industrial de dos tanques interconectados para control de nivel de líquido. Este análisis consiste en evaluar los modelos que fueron obtenidos a través de una metodología analítica y una metodología experimental de acuerdo al desempeño de la respuesta generada por el

sistema en cada uno de los casos, para un punto de operación. Los software ADAMView® y Matlab®, son herramientas utilizadas en el desarrollo de la investigación.

La finalidad de este trabajo es contribuir en la formación integral del estudiante de ingeniería en el área de control haciendo énfasis en la importancia de la aplicación de los conocimientos teóricos adquiridos y compararlos con los resultados en la práctica, reforzando de esta manera su conocimiento al resolver problemas reales de implementación diaria en la práctica industrial.

**Palabras Claves:** Análisis de técnicas de diseño de controladores, control de procesos, metodología experimental para diseño de controladores.

## 1. Introducción

Al iniciar la era industrial, la intuición y experiencia del operador eran las herramientas básicas utilizadas para el control de los procesos, por lo que esto se realizaba por prueba y error. Con el tiempo la exigencia de obtener una mejor calidad en los productos fabricados trajo como beneficio el desarrollo de teorías con las cuales se podía explicar y entender el funcionamiento de diferentes etapas en el desempeño de los procesos. De estas teorías se fueron obteniendo algunos estudios analíticos para después ser utilizados en la realización del control de la mayoría de las variables que son de especial interés en los procesos industriales.

A continuación se listan las tres razones consideradas de más relevancia [1], por las cuales el control automático se considera que es importante:

- Prevenir lesiones al personal de la planta en general, proteger el medio ambiente a través de la prevención de las emisiones y reducción de desperdicios, y prevenir daños a los equipos del proceso. La seguridad debe estar en la mente de cada una de las personas que forman parte del equipo de trabajo; es la consideración más importante.

- Mantener la calidad del producto (composición, pureza, color) continuamente y al mínimo costo.
- Mantener los índices de producción a costos mínimos.

Dentro de las diferentes clasificaciones existentes de los sistemas de control, el Control de Procesos se distingue por ser una disciplina de amplia aplicación en el desarrollo de la industria moderna. El objetivo de un sistema de control automático de procesos es ajustar la variable manipulada con la finalidad de mantener la variable controlada en su set point a pesar de las perturbaciones.

Los controladores PI y PID [2], han estado en el corazón de la práctica de la ingeniería de control por siete décadas especificando que se han registrado 408 fuentes diferentes de reglas de sintonía desde que la primera regla fue publicada. Estadísticamente 293 fuentes de reglas de sintonía se han registrado desde 1992, reflejando el aumento del interés en el uso del controlador PID recientemente.

Una de las estructuras estándar de controladores PID es la expresada por (1) [3], 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, [3].

La investigación realizada se basó en el uso de dos metodologías para la obtención de un modelo matemático que representa la dinámica del sistema en estudio. La primera metodología que se presenta en el desarrollo del trabajo es analítica [4], y la segunda utiliza una fórmula empírica [5, 6], presentando en este trabajo primeramente la descripción del sistema de planta industrial en estudio y pasando después al desarrollo realizado para la obtención de los modelos matemáticos de acuerdo a cada metodología. En la sección de resultados se encuentran las gráficas de las respuestas obtenidas por

cada modelo y tipo de controlador, para un punto de operación. Antes de concluir se presenta un análisis comparando los resultados obtenidos de cada una de las metodologías utilizadas, el cual incluye diferencias de desempeño de cada controlador.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Descripción del sistema 1/2

El sistema de planta industriales de la marca GADU modelo G500, conformado por las siguientes partes principales: sensor de flujo (1/2 pulgada, 19-30 Vcd, 0.05 Lts. / min), bomba sumergible (1/6 HP, 115 Vca, 60 Hz), *driver* para control de bomba, servo-válvula, tablero de control, computadora industrial, módulo ADAM-4022T [7], y software de programación ADAMView® [8].

En la Fig.1, se muestra un diagrama esquemático e imagen física del sistema en estudio, indicando las variables a considerar en el desarrollo del modelo matemático además de especificarlas en la Tabla 1. El diagrama de bloques del sistema está representado en la Fig. 2.

El modelo matemático que representa la dinámica del sistema de planta industrial de dos tanques interconectados, puede ser obtenido analíticamente aplicando principios físicos o a través de alguna técnica experimental. A continuación se presenta el desarrollo del trabajo realizado en la obtención de dos Modelos del sistema en estudio, cada uno basado en una de las alternativas antes mencionadas.

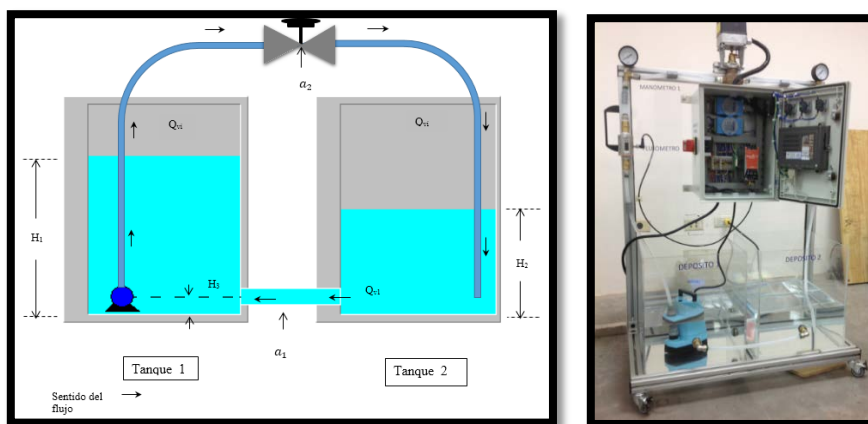


Fig.1. Diagrama esquemático e imagen física del sistema de dos tanques acoplados.

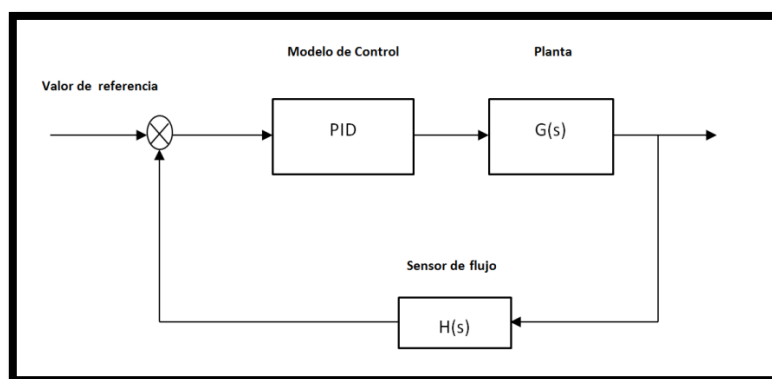


Fig.2. Diagrama de bloques general.

Variable	Descripción
$a_1$	Representa el área de la sección transversal del conducto entre ambos tanques
$a_2$	Representa el área transversal del orificio de la servo-válvula a través del cual sale el flujo de líquido hacia el tanque 1
$Q_{vi}$	Volumen de flujo de salida del tanque 1 y entrada al tanque 2
$Q_{v1}$	Volumen de flujo de salida del tanque 2 hacia el tanque 1
$H_1$	Altura de nivel de líquido en el tanque 1
$H_2$	Altura de nivel en el tanque 2

$H_3$	Altura definida entre el centro del orificio entre tanque 1 y tanque 2 a la base.
-------	---

**Tabla 1. Descripción de variables representadas en la Fig.1.**

## 2.2. Modelo analítico

El modelo analítico tiene como base la metodología presentada en [4]. La ecuación que describe la dinámica del tanque 1 tiene la forma

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{v1} - Q_{vi} \quad (2)$$

De manera similar, se representa el comportamiento para el tanque 2, con la siguiente ecuación

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{vi} - Q_{v1} \quad (3)$$

Considerando los orificios que conectan a los dos tanques y el conducto de la bomba sumergible por donde sale el flujo de líquido, como simples orificios, permite que las tasas de flujo sean relacionadas con la altura del nivel de líquido a través de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{v1} = C_{d1} a_1 (2g(H_1 - H_3))^{1/2} \quad (4)$$

$$Q_{vi} = C_{d2} a_2 (2g(H_2 - H_1))^{1/2} \quad (5)$$

en donde

$g$ : representa la constante gravitacional

$C_{d1}$ : coeficiente de descarga entre el tanque 1 y el tanque 2

$C_{d2}$ : coeficiente de descarga del orificio de la válvula

### 2.2.1. Linealización del modelo

Para estudios de diseño de sistemas de control es apropiado considerar un modelo linealizado en el cual las variables representan pequeñas variaciones respecto a los valores en estado estacionario [4]. Con lo anterior, la variable del flujo de entrada es  $q_{vi}$ , representando pequeñas variaciones respecto una tasa de flujo estable  $Q_{v1}$ . De igual manera, las otras variables representan pequeñas variaciones respecto a los valores constantes  $q_{v1}$  en  $Q_{v1}$ ,  $h_1$  en  $H_1$  y  $h_2$  en  $H_2$ . En el estado estacionario tenemos entonces la siguiente representación:

$$Q_{vi} = Q_{v1} \quad (6)$$

$$q_{v1} - q_{vi} = A_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (7)$$

$$q_{vi} - q_{v1} = A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (8)$$

Partiendo de (5), se observa que  $Q_{vi}$  es una función tanto de  $H_1$  como de  $H_2$ . Por lo tanto, al obtener una representación linealizada, la pequeña variación en flujo,  $q_{vi}$ , debe depender de la estabilidad en los niveles  $H_1$  y  $H_2$  respecto a los cuales el sistema se encuentre operando. En general, una forma de escribirlo es la siguiente:

$$q_{vi} = \frac{\partial Q_{vi}}{\partial H_1} h_1 + \frac{\partial Q_{vi}}{\partial H_2} h_2 \quad (9)$$

Diferenciando (9) parcialmente con respecto a  $H_1$  y  $H_2$ , [4], a su vez tenemos:

$$q_{vi} = \frac{C_{d2} a_2 (2g)^{1/2}}{2(H_2 - H_1)^{1/2}} (h_2 - h_1) \quad (10)$$

(10) representa el comportamiento dinámico del flujo a la salida del orificio  $a_2$ . Así (10) se reduce a la siguiente expresión:

$$q_{vi} = \frac{C_{d2} a_2 (2g)^{1/2}}{2(H_2 - H_1)^{1/2}} (h_2 - h_1) \quad (11)$$

De la misma manera, se obtiene que:

$$q_{v1} = \frac{\partial Q_{v1}}{\partial H_2} h_2 = \frac{C_{d1} a_1 (2g)^{1/2}}{2(H_1 - H_3)^{1/2}} h_2 \quad (12)$$

Llevando a cabo la sustitución de  $q_{vi}$  y  $q_{v1}$  en (7) y en (8), e introduciendo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  para simplificar las expresiones, nos lleva a obtener:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{v1} - \alpha_1 (h_2 - h_1) \quad (13)$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = \alpha_1 (h_2 - h_1) - \alpha_2 h_2 \quad (14)$$

Desarrollando, reorganizando (13) y (14) y haciendo uso de la Transformada de Laplace es posible obtener la descripción de la función de transferencia que relaciona la profundidad  $h_1$  y la profundidad  $h_2$  con la tasa del flujo de entrada  $q_{v1}$ . Lo dicho anteriormente se aprecia en las siguientes expresiones:

$$\frac{h_2(s)}{q_{v1}(s)} = \frac{\frac{1}{\alpha_2}}{1 + \frac{(A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_1 + A_2 \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} s + \frac{A_1 A_2}{\alpha_1 \alpha_2} s^2} \quad (15)$$

y

$$\frac{h_1(s)}{q_{v1}(s)} = \frac{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \left(1 + s \frac{A_2}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)}{1 + \frac{(A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_1 + A_2 \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} s + \frac{A_1 A_2}{\alpha_1 \alpha_2} s^2} \quad (16)$$

Con la finalidad de representar (15) y (16) de una manera más manejable se realizan algunas sustituciones para obtener (17) y (18):

$$\frac{h_2(s)}{q_{v1}(s)} = \frac{T_5}{1 + s(T_1 + T_2) + s^2 T_1 T_2} \quad (17)$$

$$\frac{h_1(s)}{q_{v1}(s)} = \frac{T_3 (1 + s T_4)}{1 + s(T_1 + T_2) + s^2 T_1 T_2} \quad (18)$$



En la plataforma de Matlab® se genera el código para obtener la respuesta al sistema para el punto de operación deseado.

### 2.3. Método experimental

Una fórmula empírica de sintonización, propuesta por Ziegler y Nichols a principios de 1942 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 (19) de acuerdo a la Fig.3, [5].

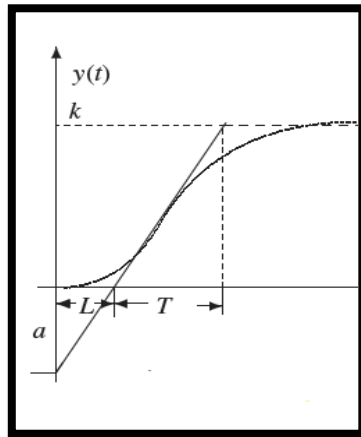


Fig.3. Tiempo de respuesta en planta con tiempo muerto.

$$G(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL} \quad (19)$$

En sistemas de control de procesos en tiempo real, una gran variedad de plantas pueden ser modeladas aproximadamente por la función de transferencia (19). Si el modelo del sistema no puede derivarse físicamente, es posible realizar experimentos con la finalidad de extraer los parámetros para aproximar (19). Por ejemplo, si la respuesta a la entrada escalón en el modelo de la planta es como la mostrada en la Fig.3, 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, [5].

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

**Tabla 2. Fórmulas de sintonización de Ziegler-Nichols.**

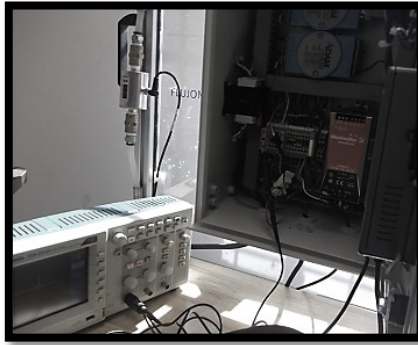
### 2.3.1. Descripción del experimento

El diagrama de bloques presentado en la Fig. 2 representa la planta en estudio [6], observándose que la realimentación de la variable se da a través del sensor de flujo. Se considera el caso de que el modelo matemático de la planta es desconocido, lo cual es común en los sistemas industriales. Con la finalidad de verificar la dinámica este tipo de sistema y extraer los parámetros para aproximar el modelo [5], se realiza un experimento, el cual consiste en instrumentar la planta en estudio con un osciloscopio para obtener las respuestas a distintas señales de prueba. La conexión entre la planta y el osciloscopio se realiza a través del módulo ADAM-4022T, [7].

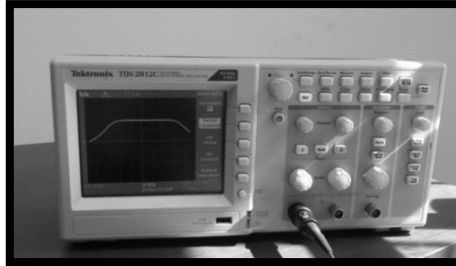
Se montó el experimento y se observó que se tiene una respuesta muy lenta del sistema, de hecho se obtiene el registro de datos después de aplicar la señal de 3 volts y en un

orden de magnitud de tiempo mayor a un minuto para alcanzar su valor final. En la Fig. 4 se presenta la imagen de la instrumentación realizada.

La Fig. 5 presenta la señal obtenida para la prueba de 5 volts, en la pantalla del osciloscopio.

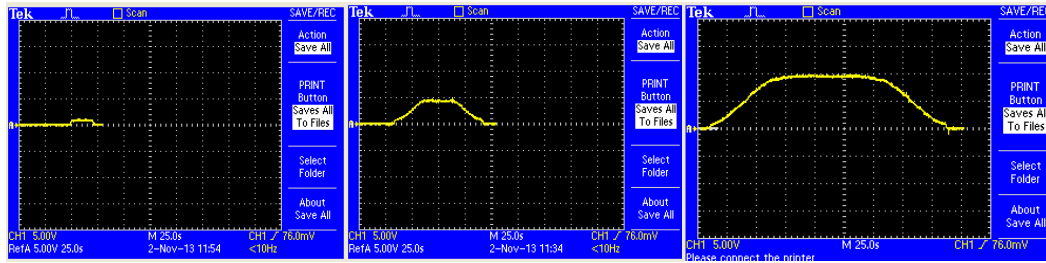


**Fig. 4. Instrumentación de la planta con el osciloscopio.**



**Fig. 5. Osciloscopio mostrando respuesta de la planta a entrada de 5 volts.**

En las figuras de la 6a a la 6c, se observan algunas de las gráficas de las señales de respuesta de la planta, mostradas en la pantalla del osciloscopio.



a).- Respuesta a 3 volts      b).- Respuesta a 5 volts      c).- Respuesta a 10 volts

**Fig. 6. Respuesta del sistema a distintas entradas tipo escalón.**

Es posible confirmar, con el comportamiento observado en estas gráficas de la Fig. 6, que el sistema tiene un retardo iniciando a partir de una señal de entrada de 3 volts.

Una vez que se obtienen los valores de respuesta de la planta para distintos valores de entradas tipo *step*, se toma la altura del nivel de líquido a la que cada una corresponde, ya que para el usuario esta es la referencia a utilizar.

Con los datos obtenidos a partir del experimento, se continúa con el desarrollo de la investigación para obtener el modelo matemático.

### 2.3.2. Modelo experimental

La siguiente fase es obtener el modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema en estudio, tomando en cuenta el experimento expuesto y los resultados de la sección 2.2.1, [5, 6], para el punto de operación de 0.2430 metros equivalente a una entrada de 5 volts, transfiriendo datos adquiridos a través de instrumentación con un osciloscopio usado como *data logger* al módulo ADAM-4022T [6, 7]; a la plataforma de Matlab®. Estos datos son representados en la gráfica de la Fig. 7.

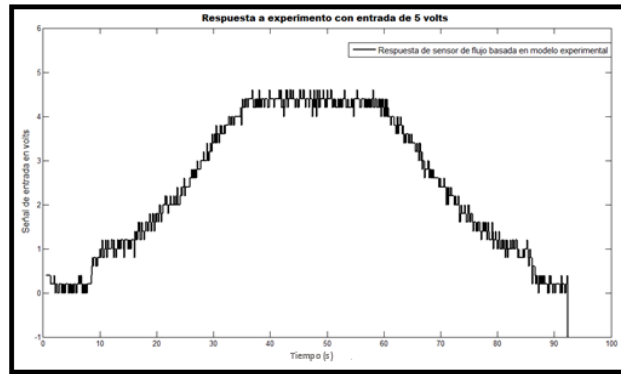


Fig. 7. Respuesta de sensor de flujo para punto de operación de 0.2430 metros.

Con (20) el modelo matemático es expresado utilizando los valores para  $k$ ,  $L$  y  $T$  [5]; mostrando en la Fig.8 el caso para el punto de operación de 0.2430 metros.

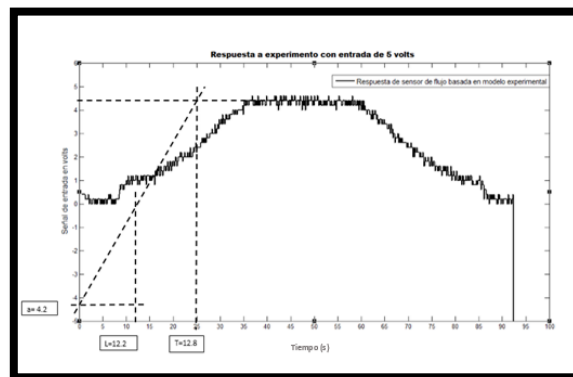


Fig.8. Obtención de los valores para  $a$ ,  $k$ ,  $L$  y  $T$ , basado en modelo experimental.

En la Tabla 3 se resumen los valores de los parámetros además del modelo matemático.

Punto de operación en metros	$a$	$k$	$L$	$T$	Modelo matemático de la planta	
0.2430	4.2	4.37	12.2	12.7	$G(s) = \frac{4.37}{1 + 12.7s} e^{-(12.2)s}$	(20)

Tabla 3. Modelo representativo del comportamiento dinámico del sistema en estudio.

### 2.3.3. Diseño de controladores P, PI y PID

Las expresiones para cada tipo de controlador se obtuvieron de acuerdo a (1) y utilizando las ecuaciones proporcionadas en las Tablas 2 y 3. Los parámetros y modelo matemático para cada tipo de controlador son presentados en la Tabla 4.

Punto de operación en metros	Tipo de controlador	$Kp$	$Ti$	$Td$	Modelo matemático del controlador	
0.2430	P	0.238	-	-	$G(s) = 0.238$	(21)
	PI	0.214	36.6	-	$G(s) = \frac{7.832 s + 0.214}{36.6 s}$	(22)
	PID	0.286	24.4	6.1	$G(s) = \frac{148.84 s^2 + 16.978 s + 0.286}{24.4 s}$	(23)

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

## 3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al simular el modelo analítico utilizando la plataforma de Matlab®. Respecto al modelo experimental el software ADAMView® [8], es utilizado como plataforma para almacenar los datos producidos al realizar la sintonización manual en la planta con cada tipo de controlador, para después, estos datos, ser importados a la plataforma de Matlab® con la finalidad de presentar el comportamiento gráficamente.

### 3.1. Modelo analítico

En las gráficas de las Figs. 9,10 y 11 se observa la respuesta obtenida con el diseño de controladores tipo P, PI y PID utilizando el modelo analítico simulado con la herramienta RTool de Matlab®.

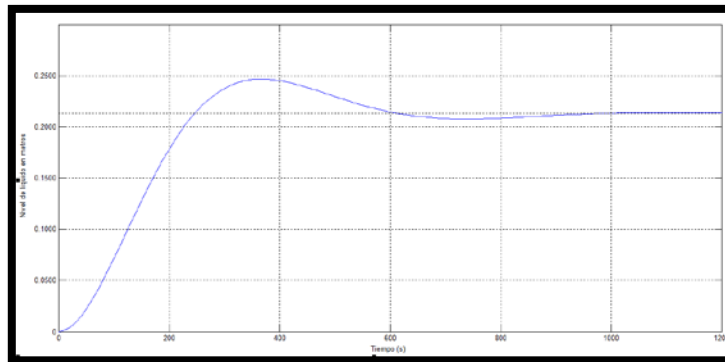


Fig. 9. Respuesta modelo analítico para controlador tipo “P”.

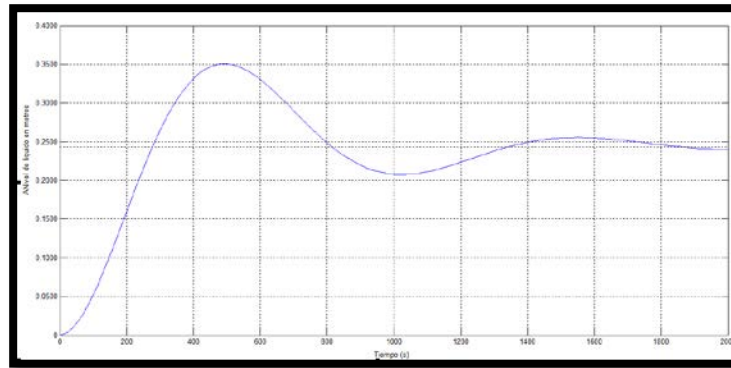


Fig. 10. Respuesta modelo analítico para controlador tipo “PI”.

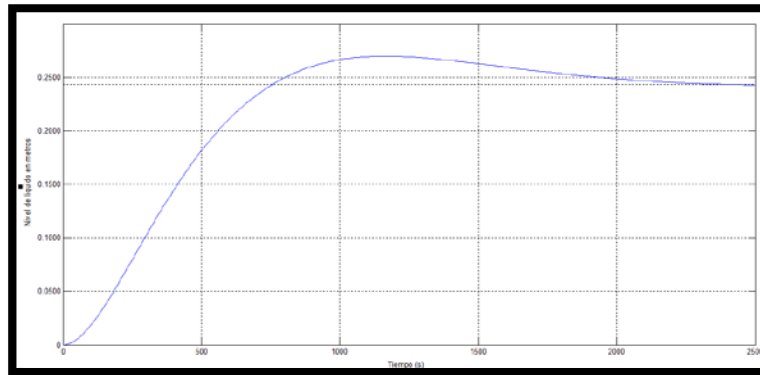


Fig. 11. Respuesta con modelo analítico para controlador tipo “PID”.

### 3.2. Modelo experimental

Utilizando la Tabla 4, se implementan los controladores P, PI y PID con datos generados a través del software ADAMView® [6, 8] y el controlador digital Módulo ADAM-4022T [6, 7]. A continuación las Figs. 12, 13 y 14, muestran las gráficas obtenidas para las respuestas del sistema haciendo uso del modelo con formula empírica en diseño de los controladores P, PI y PID, llevando a cabo la sintonización de manera experimental, para el punto de operación de 0.2430 metros de nivel de líquido. Los valores de la Tabla 4 son los parámetros de inicio en el proceso de sintonización, de acuerdo a la técnica de Ziegler-Nichols, [5].



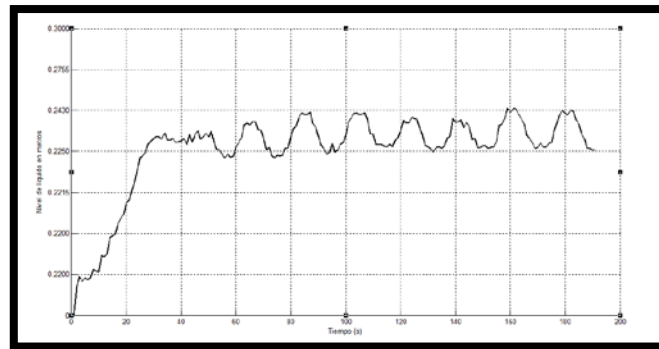


Fig. 12. Respuesta con modelo experimental para controlador tipo “P”.

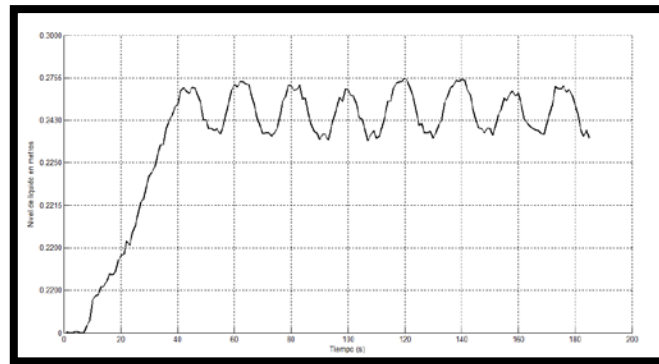
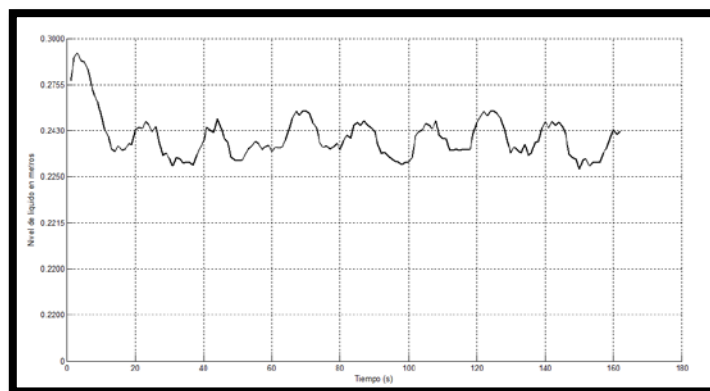


Fig. 13. Respuesta con modelo experimental para controlador tipo “PI”.



**Fig.14. Respuesta con modelo experimental para controlador tipo “PID”.**

#### 4. Discusión

La información arrojada por las gráficas de las Figs. 9 a la 14, se resume en la Tabla 5, presentada a continuación.

<b>Método</b>	<b>Nivel de líquido esperado en metros</b>	<b>Tipo de controlador</b>	<b>Nivel de líquido obtenido en metros</b>	<b>Tiempo en segundos</b>
Analítico-Sintonización automática con RTool	0.2430	P	0.2200	1000
		PI	0.2430	2000
		PID	0.2430	2500
Experimental – Sintonización manual	0.2430	P	0.2300	De 80-100
		PI	0.2430	De 60-80
		PID	0.2430	De 40-60

**Tabla 5. Resumen de resultados.**

Analizando esta información se observa una diferencia significativa en el tiempo de respuesta para lograr la estabilidad entre el modelo analítico y el experimental, pudiendo así decir que el modelo empírico sugerido por Ziegler-Nichols para el diseño de controladores en sistemas con retardo, es más sencillo y además al momento de estar realizando la implementación del experimento en la aplicación física de la planta en estudio es una gran ventaja respecto a la comprensión del funcionamiento del sistema. El método analítico involucra un procedimiento matemático extenso dando por resultado un modelo matemático que considera la mayor parte de las características del sistema

específico en estudio pero que en realidad arroja una respuesta demasiado lenta respecto a la estabilización del sistema.

## **5. Conclusiones**

Llevando a cabo un análisis de los resultados presentados en la Tabla 5, claramente se puede observar que el método experimental ofrecido por Ziegler-Nichols de la fórmula empírica para el sistema de control de nivel de líquido de nuestro caso de estudio, es el más apropiado y además si la sintonización es realizada manualmente en la planta física, de acuerdo al trabajo aquí realizado, será posible obtener los mejores resultados en cuanto a desempeño y menor tiempo de estabilización del sistema diseñando ya sea un controlador tipo PI o uno PID. Respecto al método analítico es posible observar que su deficiencia reside en que éste considera una linealización del modelo, tal vez sea por ello que en la aplicación práctica en sistemas industriales, es muy común realizar la sintonización de forma empírica, aunque se tiene el acceso a algoritmos que permiten la sintonización automática del PID, como algoritmos genéticos, por mencionar alguno, [9].

Por otro lado, se tiene que [10], la mayoría de las universidades utilizan métodos similares en la formación de futuros ingenieros en el área de diseño de circuitos de control, dando una mayor importancia al conocimiento teórico del control que a las habilidades prácticas, y esto es apoyado por libros de texto que tienen un carácter principalmente teórico. El conocimiento matemático de los estudiantes se refuerza de esta manera y pueden adquirir una buena perspectiva de las relaciones teóricas; desde nuestra perspectiva, los ingenieros reciben muy poca formación en resolver problemas reales de implementación diaria. Lo anterior ha provocado la presencia de una situación incongruente, ya que la práctica industrial rechaza los métodos modernos debido a resultados poco satisfactorios. La experiencia ha sido adquirida de una comparación entre el nuevo algoritmo de optimización del regulador PID modelo-libre y otros procedimientos de sintonización que son fáciles de describir teóricamente, pero que son difíciles de implementar en la práctica. Algunos métodos implementados que han tenido éxito son generalmente considerados como insuficientemente científicos, o permanecen en la propiedad individual de expertos

en implementación. Por lo anterior es muy importante hacer énfasis que con investigaciones aplicadas, como la presente, se deja una enseñanza muy importante a los estudiantes de ingeniería en el área de control de procesos ya que la implementación de las teorías y/o técnicas, son efectuadas en sistemas reales resolviendo así las distintas complicaciones que el mismo procedimiento lleva implícito.

Como actividad futura, se pretende seguir avanzando en el diseño de controladores implementándolos en este sistema de planta industrial bajo otro tipo de esquemas como por ejemplo utilizar un IMC (Internal Model Control) [11], o un Predictor de Smith, con el objetivo de analizar las diferencias, ventajas y desventajas en los desempeños y aplicaciones respecto a los controladores diseñados. Además se realizaran experimentos en presencia de perturbaciones con la finalidad de verificar si el diseño es robusto o no.

## 6. Referencias

- [1] C. Smith y A. Corripio. Principles and Practice of Automatic Process Control. Smith, C. y Corripio, A. 2<sup>a</sup>. Edición, Editorial John Wiley&Sons, Inc. New York, USA. 1997. Página4.
- [2] A. O'Dwyer, Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 2<sup>da</sup>. Edición, 2006. Imperial College Press. Londres. Páginas 1-4.
- [3] Y. Li, K. HeongAng y G. Chong, "PID Control System Analysis and Design".IEEE Control Systems Magazine. Volumen 26. Issue 1. Febrero 2006. Páginas 32- 41.
- [4] D.J. Murray- Smith, Continuous System Simulation. 1<sup>a</sup>. Edición ,1995. Springer. U.K. Páginas 154-157.
- [5] D. Xue, Y. Chen, y D.P. Atherton, Linear Feedback Control. 1<sup>a</sup>. Edición2007. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, PA, USA. Páginas 185-187.
- [6] M.E. Anaya Pérez, V.H. Benitez 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". EPISTEMUS Vol. 16. Junio 2014. Páginas 15-21. ISSN 2007-4530.

- [7] ADAM-4022T: Serial Base Dual Loops PID Controller User's Manual. Advantech. USA. 2006.
- [8] ADAMView®. Data Acquisition Software. Advantech. USA. 2006.
- [9] J.C. Terán-Picon, J. Anderez y O. Camacho, "Algoritmos genéticos como herramienta de ajuste para controladores PID y de modo deslizante". *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*. 2005, vol. 28, n.3,[citado 2014-08-18]. Páginas 200-2009. Disponible en:  
<[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702005000300004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702005000300004&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0254-0770.
- [10] Šulc, B. y Vrána, S., EDUCATION'09 Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Engineering education. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Stevens Point, Wisconsin, USA ©2009. ISBN: 978-960-474-100-7. Páginas 202-207.
- [11] Jelali, M. y Kroll, A. (2003). *Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control*. Great Britain: Springer. Páginas 271-274.

## 7. Autores

María Elena Anaya Pérez: Egresada de la Universidad de Sonora en 1989 como Ingeniero Industrial Administrador. Obtuvo el grado de Maestría en Calidad en 2007 por la Universidad La Salle Noroeste (ULSA Noroeste), en Cd. Obregón, Sonora, México. Actualmente cursa el programa de doctorado en Ingeniería Mecatrónica con la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP).

Victor Hugo Benitez Baltazar: Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado de la Universidad de Guadalajara en 1999. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en el 2002 y el Doctorado en Ciencias en el 2010 en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN en Guadalajara Jalisco, México. Su área de interés es el control inteligente basado en redes neuronales y el diseño digital.

Jesús Horacio Pacheco Ramírez: Ingeniero en Electrónica y Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de Hermosillo. Su área de interés es la implementación de algoritmos de control mediante técnicas computacionales e Instrumentación Virtual. Actualmente cursa el programa de doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y Cómputo con la Universidad de Arizona.

