

Control PID de procesos autoregulados e integrantes sintonizados con el método lambda

PID control of auto-regulated and integrated processes tuned using the lambda method

Fabián Guagchinga, Paola Calvopiña, Silvia Alpúsig, Mildred Cajas.
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
{cfguagchinga, jpcalvopina1, sealpusig, mlcajas}@espe.edu.ec

Resumen- Este trabajo presenta la implementación de una herramienta didáctica para determinar el valor de las constantes de un controlador PID mediante el método lambda, también conocida como IMC (Método de Control Interno). Dicha herramienta puede ser utilizada para la puesta en marcha de un proceso o ratificar los valores actuales de las constantes del controlador ya que el desgaste de los elementos que conforman un proceso afecta a su dinámica, siendo necesario actualizarlas con cierta frecuencia. Para validar la herramienta se realizaron pruebas de un proceso integrante y uno autorregulado. Se presenta como resultado la comparación de valores de constantes aplicando estrategias de control convencionales como es el PID y la metodología lambda para su sintonización, así como la respuesta del proceso a cambios similares, como punto de consigna o perturbaciones. Los resultados determinaron que mediante la sintonización lambda el control es rápido y estable.

Palabras Clave- IMC, Lambda, PID optimizado, Control y optimización, Método de ajuste.

Abstract- This work presents the implementation of a didactic tool to determine the value of the constants of a PID controller through the lambda method, also known as IMC (Internal Control Method). Such a tool can be used to start a process or ratify the current values of the constants of the controller since the wear out of the process's elements affects its dynamics, being necessary to update them frequently. In order to validate the tool, tests were carried out on an integral process and a self-regulating one. The comparison of constant values applying conventional control strategies such as PID and lambda method, as well as the response of the process to similar changes, as set point or disturbances is presented. The obtained results determining that through the lambda tuning the control is fast and stable.

Keywords-component; IMC, Lambda, Optimized PID, Control and Optimization, Tuning Method.

I. INTRODUCCIÓN

Los controladores integral, proporcional y derivativo (PID) son utilizados ampliamente en varios procesos como térmicos, hidráulicos y mecánicos, si se desea estabilidad [1]. Los controladores PID son suficientes para solucionar varios problemas de control en los que, según Astrom y Hagglund, se estima que más del 95% [2] de los lazos de control utilizan PID. Sin embargo, el 90% de los controladores PID no utilizan acción derivada porque no es simple y consume mucho tiempo para optimizar las configuraciones de controlador [3].

La mala sintonización de un controlador PID se refleja en: lazos automáticos trabajando en manual, un over flow de alarmas, incremento de desperdicios en una planta, aumento de paradas no programadas. Por ello, estos deben ser sintonizados periódicamente como una buena práctica de mantenimiento dentro de las empresas [4] y así compensar los cambios en la dinámica del proceso producidos por el desgaste de los componentes que lo confirman.

Sin embargo a pesar de su aplicabilidad, los controladores PID requieren varios intentos mediante el procedimiento de "prueba y error" [5]. Esto de alguna manera hace que el ajuste del proceso sea difícil e ineficiente. En muchas situaciones, los controladores PID son sustituidos por controladores PI (Proporcional-Integral), donde se elimina la parte de acción derivada, sacrificando el rendimiento y la eficiencia de la operación, por un proceso rápido y fácil de ajustar [3].

Para resolver el problema del ensayo y error en la sintonía, se han propuesto muchos métodos de ajuste para varios modelos de proceso, especialmente para los de primer orden con retardo o tiempo muerto [6] [7], ya que pueden explicar totalmente el comportamiento de una amplia gama de procesos. Algunos de los métodos tradicionales son presentados por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon que en la actualidad sirven en muchas aplicaciones industriales [8].

La ingeniería de control o ingeniería de sistemas de control es la disciplina de ingeniería que aplica la teoría de control para diseñar sistemas con comportamientos predecibles [5]. La Ingeniería de Control ha diversificado su aplicación y su amplio espectro de campos que van desde la Ciencia hasta la tecnología, utilizando su teoría y la práctica, cabe recalcar que las herramientas de simulación son útiles para conocer mejor el control e implementación, y así fomentar el interés de los estudiantes en la disciplina de Control Industrial, cursos de Ingeniería Eléctrica y Tecnología en Automatización e Instrumentación, esta cualidad se puede considerar como un apoyo en el proceso de enseñanza de controladores PID a varios niveles técnicos [9] [10].

Existen herramientas de ingeniería y software enfocadas al diagnóstico de lazos de control en línea como; PLANT TRIAGE, EXPERT TUNE. Sin embargo, los costos de licencia representan una limitación en el proceso enseñanza-aprendizaje. Por ello se propone el desarrollo de una herramienta para el cálculo de constantes de un controlador PID que permitan validar los valores obtenidos por un estudiante a partir de cálculos.

La herramienta se validará mediante pruebas en un proceso de control de flujo y de nivel. Se presenta como resultado el valor de las constantes halladas por la herramienta mediante el método de sintonización Lambda. Además, se muestra el comportamiento del proceso al ser controlado por un PID con las constantes obtenidas por la herramienta y por otros métodos.

II. METODOLOGÍA

Las necesidades de la industria fomentan la generación y aplicación de tecnologías para solucionar problemas enfocados en obtener mejores resultados a menor costo, aplicando mayor confiabilidad en el control de proceso [11] por ello, la academia debe formar profesionales acorde a la evolución de la industria. El conocimiento proporcionado por los centros educativos, está basado en principios teóricos, siendo el reto de las instituciones hacer que el estudiante relacione a los mismos con un escenario real [12].

El proceso de enseñanza-aprendizaje debe estar enfocado a la familiarización del estudiante con los procesos industriales y se facilita cuando se utilizan herramientas didácticas relacionadas por ejemplo la utilizada en [13], para la validación de resultados obtenidos analíticamente. Al ser verificados antes de ser implementados en una aplicación real o simulación, como se muestra en la Fig. 1. Se pueden descartar errores o proponer mejoras por etapas sin afectar el funcionamiento global del sistema.

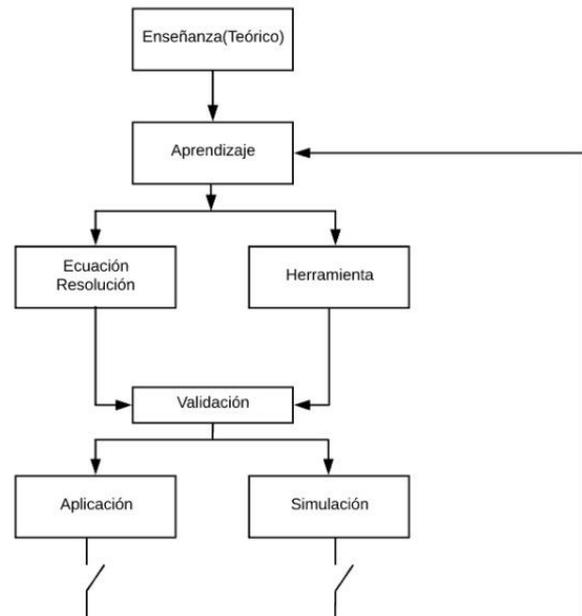


Fig. 1.- Herramientas dentro del proceso enseñanza-aprendizaje.

A. Diagrama de funcionamiento de la herramienta

La implementación de la herramienta tiene tres etapas:

- 1.- Prueba BUMP TEST
- 2.- Adquisición de datos,
- 3.- Procesamiento de información.

Para el desarrollo del BUMP TEST el sistema debe encontrarse en lazo abierto, es decir en modo manual de tal forma que se pueda modificar el valor de la CV, y registrar cómo evoluciona la PV como muestra en la Fig. 2.

Los datos en la industria serán facilitados por la empresa ya que es difícil acceder a información y más aún modificar parámetros, de modo que se utilizará el histórico propio del proceso para no interferir con su funcionamiento. Pero en el ámbito educativo el estudiante deberá vincular la herramienta con los tags del sistema de control, familiarizándose así con las bondades (el manejo) de un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales (OPC).

Para el procesamiento de datos analizará la evolución de la variable del proceso, es decir se determinará si es un proceso auto regulado o integrante, en caso de ser una mezcla de los dos, el software determinará las características predominantes y en función a esta característica estipulará las ecuaciones con las que se debe realizar los cálculos correspondientes.

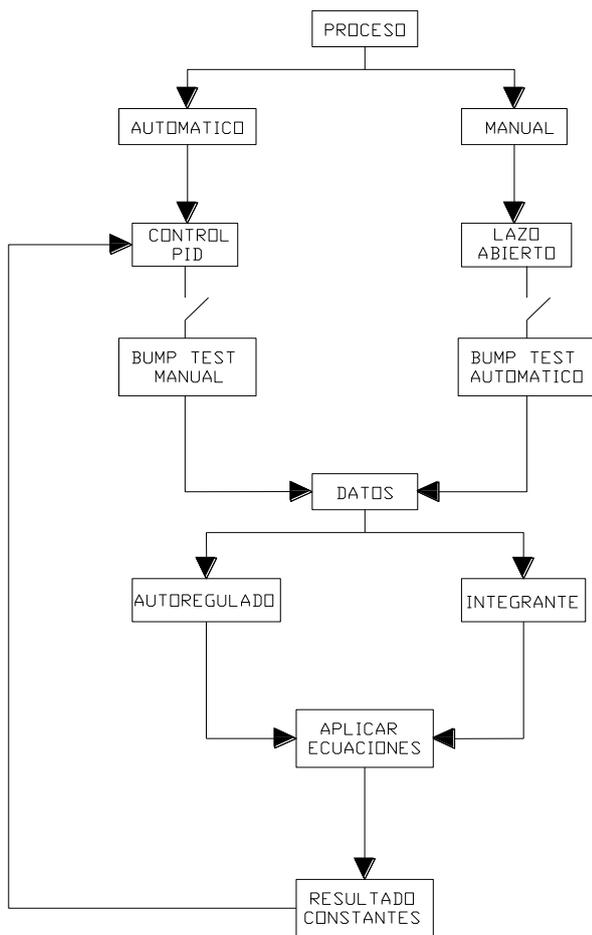


Fig. 2.- Diagrama de bloques del sistema implementado.

B. Procesos regulatorios

La herramienta se probó en un proceso de control de flujo de agua. Consta de un tanque reservorio de 50cm³, el líquido circula por una tubería de PVC en un rango de 0 a 30GPM, valor que es captado por un transmisor GEORGE FISHER que suministra una señal de 4 a 20 mA a un PLC Siemens s7-1200 que emite una señal de 0 a 10V al variador POWER FLEX para modificar la fuerza de succión de líquido que recircula al tanque, como muestra la Fig. 3(a).

Una vez que el sistema se encuentra en modo manual se cambiaron los valores de voltaje suministrados al variador, es decir se modificó CV, para analizar la evolución de la variable flujo. La Fig. 3(b) muestra que la respuesta del sistema corresponde a una variable autorregulada pues ante un cambio esta se modifica hasta estabilizarse en un valor.

C. Procesos integrantes

La Fig. 4(a) muestra el funcionamiento de proceso de control

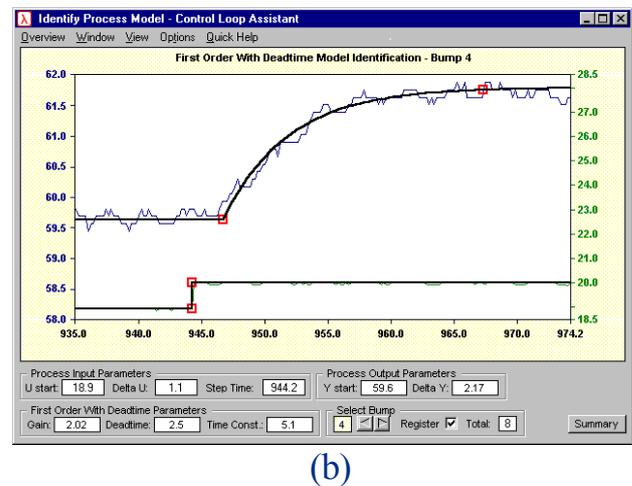
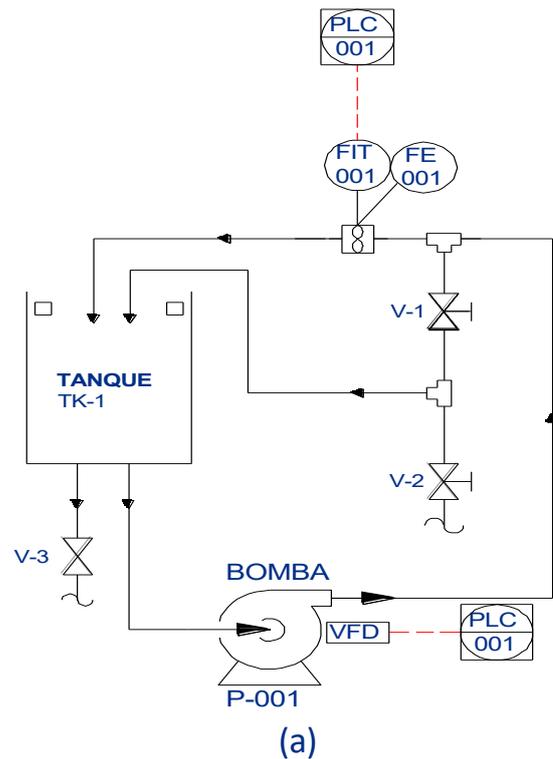


Fig. 3.- (a) P&ID de flujo (b) Respuesta en lazo abierto.

de nivel de agua. El líquido circula por una tubería de PVC hasta llegar a una columna de 80cm de alto, valor que es captado por el principio de medición de nivel por presión diferencial. Se usa un transmisor de presión Rousemont 453 que suministra una señal de 4 a 20 mA a un PLC Siemens s7-1200 que emite una señal de 0 a 10V a un sistema motor bomba variador simular el proceso flujo.

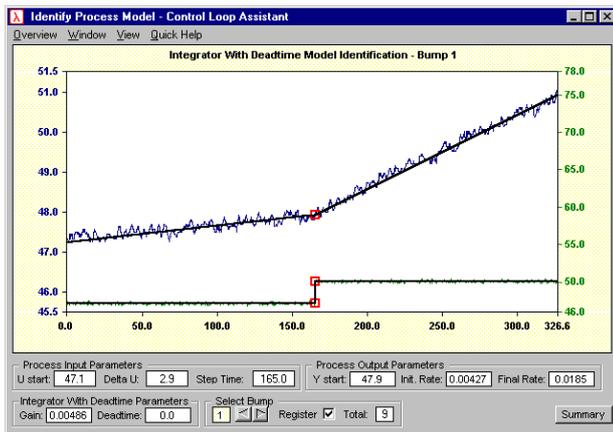
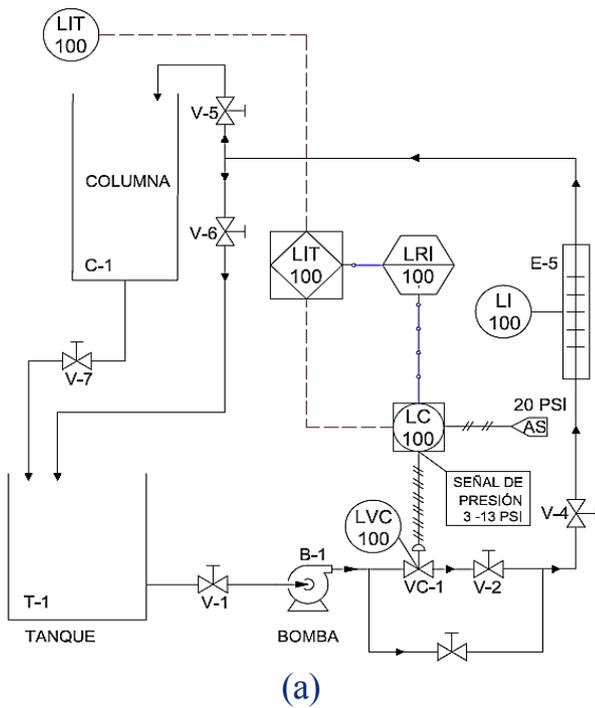


Fig. 4.- a) P&ID de nivel, b) Respuesta en lazo abierto.

Para determinar el tipo de proceso se colocó al controlador en modo manual, y se cambiaron los valores de corriente suministrados al IP, es decir se modificó CV, para analizar la evolución variable nivel. La Fig. 4(b) muestra que la respuesta del sistema corresponde a una variable integrante pues ante un cambio esta se modifica y no llega a estabilizarse en un valor[14].

D. Sintonización del controlador PID

El éxito de la sintonización de un proceso es; establecer qué tipo de respuesta se desea, determinar si es integrante o

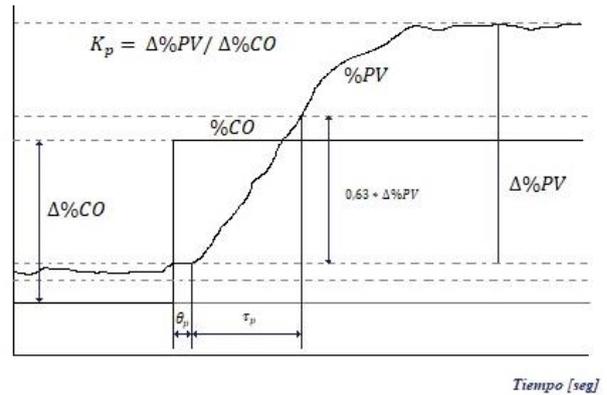


Fig. 5.- Respuesta al cambio en la salida del controlador en manual de un proceso autoregulado

autorregulado como se analizó en la sección anterior, además el tipo de ecuación PID que utiliza el controlador para realizar las acciones correctivas. Es por ello que en esta sección se describen las ecuaciones que se utilizan en cada caso.

1) PID

Existen varios tipos de ecuaciones de controladores PID, las tres más utilizadas son: ideal, paralela y serie. Es importante determinar qué tipo utiliza el controlador para cada lazo, pues algunos tienen los tres tipos y los valores de constantes varían de forma numérica dependiendo de la variante de la ecuación que se utilice.

- Ecuación PID Paralela: cada acción (P, I y D) están en términos separados en la ecuación, para luego ser sumados:

$$m = K_p * e + \frac{1}{T_i} \int(e)dt + T_d * \frac{de}{dt} + b \quad (1)$$

- Ecuación PID Ideal o ISA: el término de ganancia K_p afecta a las otras tres acciones:

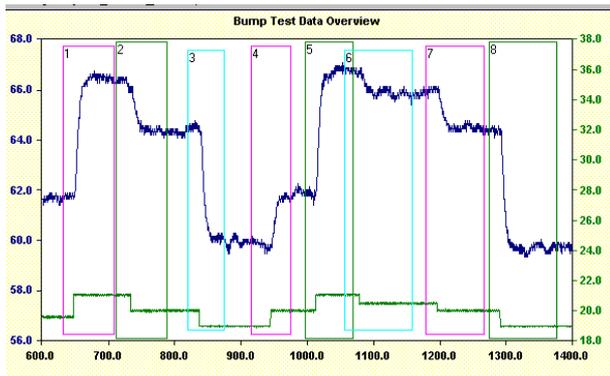
$$m = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int(e) dt + T_d * \frac{de}{dt} + b \right) \quad (2)$$

- Ecuación PID Serie: la ganancia K_p afecta a los otros tres términos (P, I y D), como en la ecuación Ideal. La diferencia, es que tanto la integral como la derivativa tienen un efecto en la acción proporcional también:

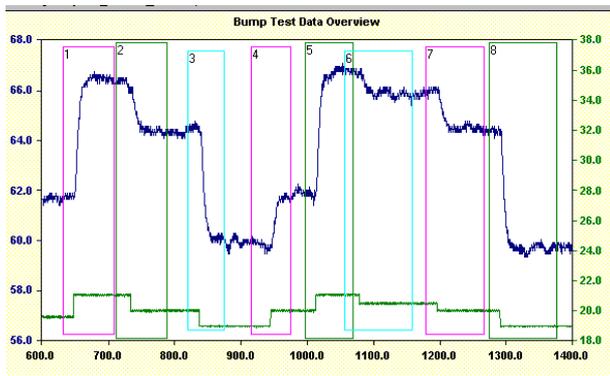
$$m = K_p \left[\left(\frac{T_d}{T_i} + 1 \right) * e + \frac{1}{T_i} \int(e)dt + T_d * \frac{de}{dt} \right] + b \quad (3)$$

2) Tipo de proceso

Además de determinar el tipo de proceso es importante determinar las características propias del proceso [15]. En la Fig. 5 se muestra la respuesta al cambio en la salida de un controlador manual de un proceso autorregulado a partir de los cuales se puede definir el tipo de proceso. En particular, los parámetros a considerar son:



(a)



(b)

Fig. 6.- Pruebas BUMP TEST (a) Flujo (b) Nivel

TABLA 1
Características de los procesos

	Flujo	Nivel
K_P	0,55131	0,2256
T_d (s)	0,8000	0,9000
T_{ao} (ms)	0,6700	0,3333

K_p La ganancia del proceso en lazo abierto
 τ Constante de tiempo del proceso Tiempo
 T_d muerto del proceso
 $\lambda = f * \tau$ Donde f son enteros positivos

- *Proceso Autorregulado:* para calcular la ganancia del proceso en lazo abierto se utiliza (3) para calcular la ganancia en lazo cerrado (K_c) y el tiempo integral (T_i) se utiliza (4) [16].

$$K_c = \frac{\tau}{K_p(\lambda + T_d)} \tag{3}$$

$$T_i = \tau \tag{4}$$

TABLA 2
Constantes PID para controlar el proceso flujo al variar Lambda

f	λ	Ti	Kc	Td
1	0,67	0,67	0,826726	0,000726
2	1,34	0,67	0,56789123	0,000123
3	2,01	0,67	0,43248656	0,000656
4	2,68	0,67	0,34922047	0,002047
5	3,35	0,67	0,2928403	0,000403
6	4,02	0,67	0,25213428	0,003428
7	4,69	0,67	0,22136379	0,006379
8	5,36	0,67	0,19728689	0,008689
9	6,03	0,67	0,17793371	0,003371
10	6,7	0,67	0,1620383	0,00383

- *Proceso Integrante:* para calcular la ganancia del proceso en lazo abierto se utiliza (5) para calcular la ganancia en lazo cerrado (K_c) y el tiempo integral (T_i) se utiliza (6) [17].

$$K_c = \frac{2\lambda + T_d}{K_p(\lambda + T_d)^2} \tag{5}$$

$$T_i = 2\lambda + T_d \tag{6}$$

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Ya sea usando el histórico de la empresa o la opción de propia de la herramienta, el proceso se debe encontrar en lazo abierto se aplican cambios del Control Value (CV), eléctricamente es un rango de voltaje de 0 a 10V (para los procesos analizados) que es suministrado al variador de frecuencia, y en función a esos cambios se analiza la respuesta de process Value (PV) que es la variable física.

La Fig. 6(a) muestra el resultado de la prueba BUMP TEST de flujo, mientras que la Fig. 6(b) el comportamiento de nivel. La herramienta detecta cada cambio de CV y analiza el comportamiento de PV, para determinar el tipo de proceso como se explicó en la sección II, presentado las características del mismo como muestra en la Tabla 1.

Basados en las características del autómata programable se determina el tipo de ecuación PID (ver sección III) que usa el autómata, los rangos de trabajo de la variable física, y previo

TABLA 3
Constantes PID para controlar el proceso nivel al variar Lambda

f	λ	Ti	Kc	Td
1	0,76	0,67	0,826726	0,000726
2	1,54	0,67	0,56789123	0,000123
3	2,51	0,67	0,43248656	0,000656
4	2,99	0,67	0,34922047	0,002047
5	3,25	0,67	0,2928403	0,000403
6	4,02	0,67	0,25213428	0,003428
7	4,69	0,67	0,22136379	0,006379
8	5,36	0,67	0,19728689	0,008689
9	6,03	0,67	0,17793371	0,003371
10	6,7	0,67	0,1620383	0,00383

haber subido los históricos del bump test, se ejecuta el software y genera la Tabla 2 y Tabla 3, que proporciona las constantes PID a diferentes velocidades de respuesta, resaltando la que más se acerca a la solicita por el usuario. En este caso la acción integral se refleja cómo tiempo integral en función a las características del PLC.

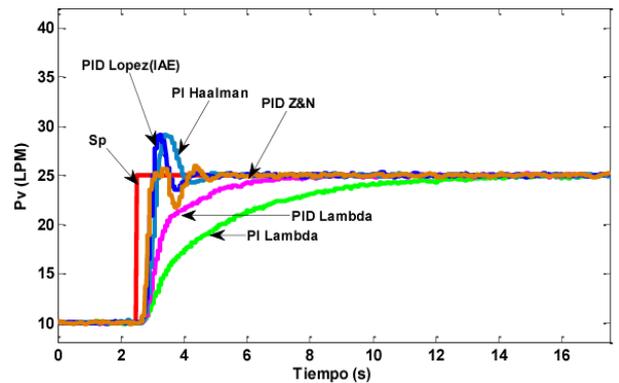
La Fig. 7(a) muestra el comportamiento del control automático de flujo utilizando un controlador PID, sintonizado por varios métodos, mientras que Fig. 7(b) refleja el comportamiento del control de nivel.

Para un proceso integrante o autorregulado Lambda se escoge dependiendo de si requiere que el control sea muy apretado, o sea relajado. Normalmente, el último caso es el más común ya que estas variables no necesitan estar pegadas a SP todo el tiempo, lo que suaviza la curva de accionamiento del elemento de control final para largar su vida útil, pero manteniéndose la mayor parte de tiempo en el valor deseado.

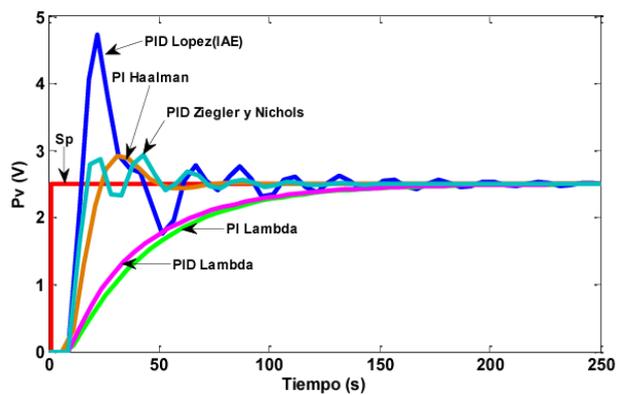
IV. CONCLUSIONES

La herramienta propuesta en es útil para identificar el tipo de proceso que se va a controlar, además al tener como requisito el tipo de ecuación PID que se utilizará le recuerda al usuario consultar con cuál de las variaciones de la ecuación trabaja el autómat, que es una práctica muy olvidada, lo que puede confundirse con un error de sintonización al momento de probar las constantes.

Los resultados muestran que la variable de proceso sigue al valor deseado sin presentar cambios bruscos, lo que evita el desgaste mecánico del elemento de control final, además el



(a)



(b)

Fig. 7.- Respuestas del control en lazo cerrado controlado por PID para el proceso de a) Nivel y b) Flujo.

método al no requerir que el sistema oscile se puede aplicar en procesos críticos sin poner en riesgo la integridad del Sistema y sus usuarios y operadores.

La herramienta proporciona las características propias del proceso, como es el tiempo de repuesta en lazo abierto de modo que el usuario pueda tener una referencia del tiempo de respuesta mínimo que pueda esperar en lazo cerrado, y así asimile los tipos de respuesta que el sistema puede generar en realidad.

REFERENCIAS

[1] P. Sharma y R. Gupta, «Tuning of PID Controller for a Linear BLDC Motor Using TLBO Technique», en *2014 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, Bhopal, India, 2014, pp. 1224-1228.

[2] D. E. Rivera Flores, «Una metodología para la identificación integrada con el diseño de controladores imc-pid», *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 4, n.º 4, pp. 5-18, oct. 2007.

- [3] W. Lima Torres, I. Bezerra Queiroz Araujo, J. Bezerra Menezes Filho, y A. Goncalves Costa Junior, «Mathematical Modeling and PID Controller Parameter Tuning in a Didactic Thermal Plant», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, n.º 7, pp. 1250-1256, 2017.
- [4] M. Pradeep, B. Sharmila, D. Devasena, y K. Srinivasan, «PID and $PI\lambda D\mu$ Controller Implementation for Speed Control Analysis of Two Mass Drive System», p. 4.
- [5] S. Ramasamy, H. V. Pradhan, P. Ramanathan, P. Arulmozhivarman, y R. Tatavarti, «A novel and pedagogical approach to teach PID controller with LabVIEW signal express», en *2012 IEEE International Conference on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA)*, Kottayam, India, 2012, pp. 1-8.
- [6] E. Pruna, E. R. Sasig, y S. Mullo, «PI and PID controller tuning tool based on the lambda method», en *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Pucon, 2017, pp. 1-6.
- [7] F. Castrillón Hernández y D. Castellanos-Cárdenas, «New tuning rules for PID controllers based on IMC with minimum IAE for inverse response processes», *DYNA*, vol. 82, n.º 194, pp. 111-118, dic. 2015.
- [8] L. W. Tan, R. K. Raja Ahmad, M. N. Ibrahim, y F. S. Taip, «Relationship of lambda and overshoot of step response for a direct synthesis PI controller», *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 29, n.º 3, pp. 537-548, sep. 2012.
- [9] V. H. Andaluz *et al.*, «Multi-user Industrial Training and Education Environment», en *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, vol. 10851, L. T. De Paolis y P. Bourdot, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 533-546.
- [10] R.-E. Precup, S. Preitl, M.-B. Radac, E. M. Petriu, C.-A. Dragos, y J. K. Tar, «Experiment-Based Teaching in Advanced Control Engineering», *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, n.º 3, pp. 345-355, ago. 2011.
- [11] E. P. Management, «Lambda Tuning as a Promising Controller Tuning Method for the Refinery», p. 10.
- [12] J. Sanchez, H. Vargas, y S. Dormido, «Web-based learning resources for vocational training on control and measurement systems: The AutoTECH project», en *2007 European Control Conference (ECC)*, Kos, 2007, pp. 1831-1838.
- [13] E. Pruna, F. Bayas, H. Cocha, I. Escobar, A. Gordon, y P. Constante, «Implementation of a simulator of industrial processes», en *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, Curicó, Chile, 2016, pp. 1-6.
- [14] A. L. S. Nair, S. A. J. Mary, y J. A. Linsely, «Modeling and control of level control process — A comparative study», en *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, 2017, pp. 1-4.
- [15] B. Vasu Murthy, Y. V. Pavan Kumar, y U. V. Ratna Kumari, «Application of neural networks in process control: Automatic/online tuning of PID controller gains for $\pm 10\%$ disturbance rejection», en *2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, Ramanathapuram, India, 2012, pp. 348-352.
- [16] N. Hambali, H. F. Halim, y J. Johari, «Implementing Problem-Based Learning in Process Control Laboratory for Final Year Electrical Engineering undergraduates: Flow control plant», en *2015 IEEE 7th International Conference on Engineering Education (ICEED)*, Kanazawa, Japan, 2015, pp. 85-89.
- [17] E. Bullinger y F. Allgower, «Adaptive X-tracking for Nonlinear Systems with Higher Relative Degree», p. 6.