

PI and PID Controller Tuning Tool Based on the Lambda Method

Edwin Pruna

*Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Sangolqui, Ecuador
eppruna@espe.edu.ec*

Edison R. Sasig

*Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Sangolqui, Ecuador
erssig@espe.edu.ec*

Santiago Mullo

*Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Sangolqui, Ecuador
sdmullo@espe.edu.ec*

Abstract—This paper presents a lambda tuner tool for the analysis and the design proportional-integral-derivative (PID) controllers using Matlab/Simulink software. The proposed application allows the user to easily obtain control parameters with lambda method and several traditional tuning methods. The lambda method guarantees robustness, stability and non-oscillatory response. It should be noted that the traditional tuning methods can't deal with such problem. The tuning methods use the plant model described by a first order system with delay. Also, step response and simulation of the control system designed are shown. Finally, the validation of the platform developed is tested with several simulations and an experimental test in a flow process using a Compact Logix PLC. The experimental results show that the proposed tool has a high performance.

Keywords—lambda, non-oscillatory, PID, tuning methods, controllers gains, industrial processes

I. INTRODUCCIÓN

Los controladores PI y PID han sido usados por años para el control de todo tipo de procesos en la industria química y alimenticia, industria minera, industria móvil y aeroespacial, entre otras [1],[2]. Dada la larga historia de los controladores PI y PID, los métodos de sintonía han sido sin duda la clave para un rendimiento satisfactorio y robusto. Por lo tanto, se han propuesto muchos métodos de ajuste para varios modelos de proceso, especialmente para los de primer orden con retardo (FOPDT), ya que pueden explicar suficientemente el comportamiento de una amplia gama de procesos [3]. Algunos de los métodos tradicionales son presentados por Ziegler-Nichols [4] y Cohen-Coon [5] que en la actualidad sirven en muchas aplicaciones industriales.

Hoy en día, la mayoría de las líneas de producción pequeñas y medianas son controladas por los controladores lógicos programables (PLC) que permiten al usuario crear un sistema simple de control así como estructuras más complejas. El objetivo principal que asegura la funcionalidad correcta del sistema de automatización es un ajuste adecuado de los parámetros del controlador [6]. La selección adecuada de los parámetros permite reducir el costo de operación del proceso debido a las pérdidas de energía y de material.

Recientemente, los fabricantes de sistemas de automatización han desarrollado herramientas de software que permiten sintonizar controladores PID implementados en PLCs, utilizando algoritmos propietarios [7], [8]. Sin embargo, los métodos implementados no permiten diseñar el sistema de control en términos de índices de rendimiento específicos como integral del error cuadrático (ISE) o la integral del valor absoluto del error (IAE), además utilizan métodos de sintonía tradicionales.

La mayoría de las aplicaciones permiten obtener sistemas de control con oscilaciones y no disponen de procedimientos automáticos para ajustar el controlador de tal manera que garantice, la robustez y una respuesta sin oscilaciones. Sobre la base de estas premisas la elección del método adecuado en el entorno industrial puede ser muy importante. En los últimos años la industria ha empezado a aprovechar los beneficios del método de sintonía Lambda con un significativo impacto económico debido a que se elaboran productos más uniformes a menor costo [9]. El método de sintonía Lambda está relacionado con el Control con Modelo Interno (IMC) y el Control Predictivo basado en modelo (MPC).

Estos hechos fueron la inspiración para crear la aplicación que combina las funcionalidades mencionadas anteriormente: la sintonía de los parámetros del controlador PI y PID con el método Lambda y métodos tradicionales, la verificación del sistema de control en el tiempo utilizando dos criterios de desempeño el Porcentaje de Error Máximo (PEM), y la Integral del error absoluto (IAE). La herramienta simplifica el proceso de selección de reglas de sintonización y puede ser utilizado por ingenieros de campo con conocimientos básicos en ingeniería de control.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe los métodos de sintonía y ecuaciones de diseño. Luego, en la Sección 3, se presenta la arquitectura de software y los detalles de funcionamiento de la herramienta propuesta. La Sección 4 describe las pruebas y los resultados obtenidos mediante simulación y experimentación. Finalmente, las conclusiones se presentan en la Sección 5.

II. MÉTODOS DE SINTONÍA Y ECUACIONES DE DISEÑO

A. Método de Sintonía Lambda

El método de sintonía lambda es ampliamente usado en la industria de pulpa y papel, donde hay una conexión entre la uniformidad del papel y la eficiencia manufacturera [9]. Cuando fue introducido por Dahlin en 1968 [10], el ajuste de lambda ofreció una nueva forma de coordinar la sintonía de los bucles de la fábrica de papel para ganar estabilidad del proceso junto con un producto uniforme. Esta técnica de sintonía es relativamente nueva en otras industrias.

Para la obtención del diseño PID, considere la función de transferencia PID serie o interactuante

$$C'(s) = K'_c \left(\frac{(1+sT'_i)(1+sT'_d)}{sT'_i} \right) \quad (1)$$

Donde:

K'_c = Ganancia Proporcional

T'_i = Tiempo Integral

T'_d = Tiempo Derivativo.

El modelo de la planta correspondiente a un sistema de primer orden con retardo es dado como

$$G(s) = \frac{K}{1+sT} e^{-sL} \quad (2)$$

Donde K es la ganancia del proceso, T es la constante de tiempo en lazo abierto y L es el retardo.

La expresión exponencial de (2) puede ser calculada mediante la aproximación de Padé de primer orden, es decir

$$e^{-sL} = \frac{1 - \frac{L}{2}s}{1 + \frac{L}{2}s} \quad (3)$$

Entonces, sustituyendo la aproximación (3) en el modelo de planta (2), la función de transferencia se convierte en

$$G(s) = \left(\frac{K}{1+sT} \right) \left(\frac{1 - \frac{L}{2}s}{1 + \frac{L}{2}s} \right) \quad (4)$$

El método de sintonía lambda consiste en cancelar los polos del proceso con los ceros del controlador [11]. Por lo tanto, considere el tiempo integral como $T_i = T$ y el tiempo derivativo como $T_d = L/2$ entonces, la función de transferencia del lazo tiene la siguiente forma

$$G_1(s) = G(s)C'(s) = \frac{KK'_c \left(1 - s\frac{L}{2} \right)}{sT} \quad (5)$$

Luego, la ecuación característica del sistema en lazo cerrado es dada por:

$$s \left(T - KK'_c \frac{L}{2} \right) + KK'_c = 0 \quad (6)$$

El polo en lazo cerrado requerido es $s = -1/\lambda$, dando las siguientes reglas de sintonía.

$$K'_c = \frac{T}{K \left(\frac{L}{2} + \lambda \right)} \quad T'_i = T \quad T'_d = \frac{L}{2} \quad (7)$$

Donde es un parámetro que regula la velocidad de respuesta del sistema. Aumentando λ disminuye la velocidad de respuesta y disminuyendo λ ocurre el efecto contrario. Para un controlador robusto $\lambda = 3T$ y para una sintonía inmediata $\lambda = T$.

En este artículo se utiliza el controlador PID en su forma no interactuante o estándar (ISA). Por lo tanto (7) puede representarse en su forma estándar con las siguientes ecuaciones.

$$K_c = K'_c \frac{T'_i + T'_d}{T'_i} \quad T_i = T'_i + T'_d \quad T_d = \frac{T'_i T'_d}{T'_i + T'_d} \quad (8)$$

Para el diseño PI se considera el controlador con la siguiente función de transferencia.

$$C_1(s) = K_c \left(\frac{1 + sT'_i}{sT'_i} \right) \quad (9)$$

Un tiempo integral $T_i = T$, y si el retardo de tiempo se aproxima mediante series de Taylor $e^{-sL} = 1 - sL$. La ecuación característica del sistema en lazo cerrado es

$$s(T - KK_c L) + KK_c = 0 \quad (10)$$

Dando las siguientes reglas de sintonía tanto para controladores estándar y serie.

$$K_c = \frac{T}{K(L + \lambda)} \quad T_i = T \quad (11)$$

B. Método de Sintonía de Ziegler y Nichols

El método de Ziegler Nichols [4] se conoce como método típico en la práctica de sistemas de control de primer orden y constituyen la base de los procedimientos de sintonía utilizados por los fabricantes de controladores y la industria de procesos. El método consiste en obtener los parámetros de control a

partir de la determinación de algunas características de la dinámica del proceso. Entonces, los parámetros se expresan en términos de estas características mediante las siguientes fórmulas.

$$K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{T}{L} \right) \quad T_i = 2L \quad T_d = 0.5L \quad (12)$$

C. Método de Sintonía de López, Miller, Smith y Murtil (IAE)

El primer método basado en criterios integrales para el cálculo de los parámetros del controlador PID estándar fue desarrollado por López, Miller, Smith y Murtil [12]. El método consiste en minimizar un criterio de desempeño integral, uno de los criterios de desempeño utilizados por López fue: Integral del error absoluto (IAE).

Las ecuaciones de sintonización son:

$$K_c = \frac{1.435}{K} \left(\frac{L}{T} \right)^{-0.921}$$

$$T_i = \frac{T}{0.878} \left(\frac{L}{T} \right)^{0.749} \quad T_d = 0.482T \left(\frac{L}{T} \right)^{1.137} \quad (13)$$

D. Método de Sintonía de Haalman

El método de Haalman sugiere seleccionar la función de transferencia del lazo.

$$G_1(s) = G(s)C(s) = \frac{2}{3Ls} e^{-sL} \quad (14)$$

Donde

$$K_c = \frac{2T}{3KL} \quad T_i = T \quad (15)$$

Una característica del método de Haalman es que los polos y ceros del proceso se cancelan por polos y ceros en el controlador. Cuando se cancelan los polos y ceros, habrá modos no controlables en el sistema en lazo cerrado.

III. ARQUITECTURA DEL SOFTWARE

En la creación de la herramienta de ajuste se utiliza el software Matlab, para el desarrollo de los métodos de sintonía se consideran las ecuaciones descritas en el apartado 2, se implementan 5 métodos de sintonía de controladores PI y PID (PI Lambda, PID Lambda, PI Haalman, PID Ziegler y Nichols, PID (IAE)). La interfaz gráfica de usuario correspondiente a la herramienta de ajuste PI y PID se presenta en la Fig. 1.

El modelo matemático de un proceso industrial se caracteriza por el grupo de parámetros ubicados al lado izquierdo-superior de la pantalla (fig.1) y pueden ser modificados por el usuario, en dicho panel está disponible un

menú para seleccionar el método de sintonización y el tipo de controlador, y en el centro se muestran las ganancias del controlador calculadas y de ser el caso pueden ser modificados para una sintonía fina. Para la configuración de los tiempos de simulación se dispone de un panel que contiene el tiempo de parada y muestreo.

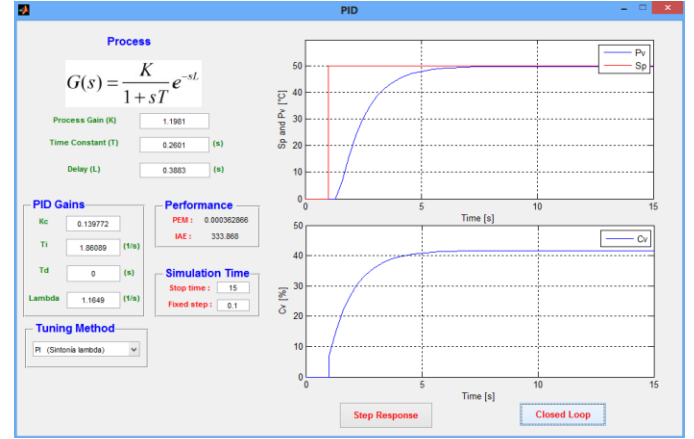


Fig. 1. Interface de usuario para el diseño de controladores PI y PID.

Dos graficas son mostradas en el lado derecho de la pantalla, donde se muestran la respuesta del sistema en el dominio del tiempo para la salida (PV), referencia (SP) y la entrada (CV). Dos botones están disponibles para seleccionar el modo de simulación. Estos modos son respuesta en lazo abierto y respuesta en lazo cerrado. Además, se definió dos criterios de desempeño el Porcentaje de Error Máximo (PEM), y la Integral del error absoluto (IAE).

La estructura de software para la aplicación descrita es mostrada en la Fig. 2.

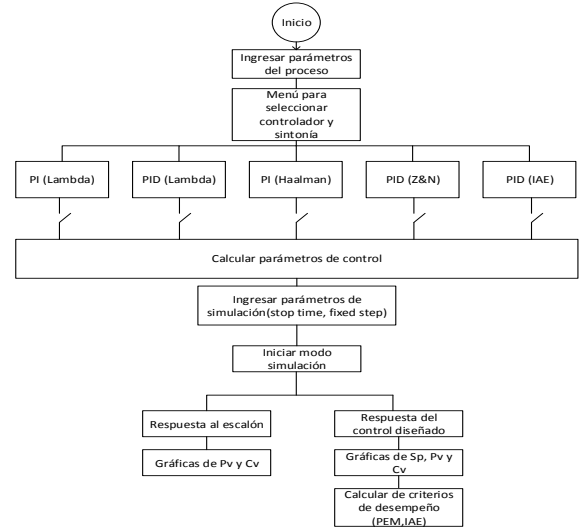


Fig. 2. Arquitectura de software de la herramienta de sintonía.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el fin de validar la herramienta de sintonía, se realizan pruebas en 3 procesos diferentes los mismos se describen a continuación:

A. Ejemplo simulado de un sistema de nivel de líquido

La Fig. 3 muestra la vista esquemática de sistema de control de nivel de líquido [14]. Este proceso hace que el nivel del líquido mantenga una altura constante, donde un transmisor de nivel de capacitancia convierte el aumento/caída del líquido en corriente de 4-20 mA. Esta corriente se convierte de 0-5V usando un convertidor I/V y se envía al controlador de proceso a través de la tarjeta de adquisición de datos. La señal de control pasa por un convertidor V/I para convertir la tensión en corriente y finalmente es convertida en presión para regular la posición de la válvula.

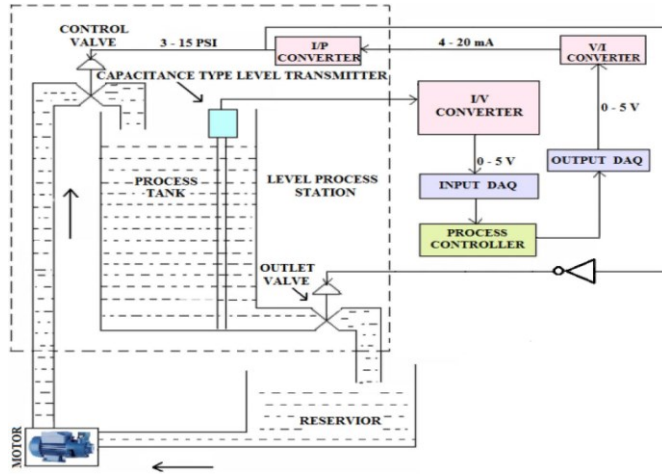


Fig. 3. Diagrama esquemático para el control de nivel de líquido.

El modelo del sistema de control de nivel de líquido tiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.315}{1+12.826s} e^{-8.415s}$$

La Fig. 4 muestra la comparación de respuestas del sistema diseñado con los métodos de sintonía descritos en la Sección 2 y la Tabla I muestra los parámetros del sistema PID no interactuante diseñado e índices de desempeño en el dominio del tiempo.

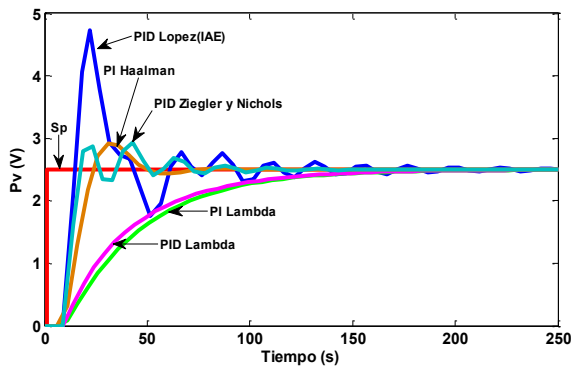


Fig. 4. Comparación de las respuestas del sistema de nivel de líquido con diferentes métodos de sintonía.

El control de nivel es ampliamente utilizado en diferentes industrias como la industria nuclear, la industria química, sistemas de purificación de agua, y entre otras. El objetivo de

control es mantener constante el nivel del líquido en su valor de referencia sin producir derrames o excesos que podrían afectar al medio ambiente y la economía de la industria. Por lo tanto, los resultados de simulación muestran que el método lambda cumple con este objetivo ya que asegura que el nivel no supera su punto de ajuste después de un cambio de referencia.

TABLA I. PARÁMETROS PI Y PID E ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Método	Parámetros				
	K_c	T_i	T_d	PEM (%)	IAE
PI Lambda	0.8683	12.8260	0	No overshoot	0.5031
PID Lambda	1.26681	17.0335	3.1682	No overshoot	1.4390
PI Haalman	3.2258	12.8260	0	16.8911	0.2373
PID Z & N	5.8064	16.83	4.2075	17.4519	0.3197
PID Lopez IAE	6.0561	5.9949	5.9809	89.1142	0.3849

B. Ejemplo simulado de un sistema de temperatura de vapor

Para el segundo problema simulado, considere el siguiente sistema de temperatura de vapor estudiado en [15], el modelo FOPDT es dado como

$$G(s) = \frac{0.5}{1+200s} e^{-225s}$$

Los parámetros y criterios de desempeño obtenidos con los métodos de sintonización descritos en la Sección 2 y aplicables a un controlador PID no interactuante, se muestran en la Tabla II y las curvas de respuesta de los diferentes métodos de sintonización se muestran en la Fig. 5.

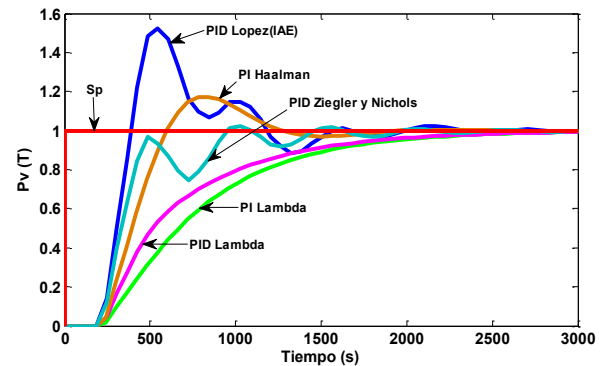


Fig. 5. Comparación de las respuestas del sistema temperatura de vapor con diferentes métodos de sintonía.

TABLA II. PARÁMETROS PI Y PID E ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Método	Parámetros				
	K_c	T_i	T_d	PEM (%)	IAE
PI Lambda	0.4848	200	0	No overshoot	0.2813
PID Lambda	0.8772	312.5	72	No overshoot	0.6226
PI Haalman	1.1852	200	0	17.38	0.1758
PID Z & N	2.1333	450	112.5	2.3724	0.5801
PID Lopez IAE	2.3705	184.29	119.36	52.4072	0.5933

Los resultados de simulación muestran que el método de sintonía lambda evita el exceso o la falta de temperatura que pueden afectar considerablemente la seguridad y la economía de la planta. El exceso de temperatura puede destruir las tuberías o la turbina de vapor y la falta de temperatura reducirían el rendimiento térmico de la planta.

C. Ejemplo experimental de un sistema de flujo

Finalmente considere un sistema experimental de flujo dado en [16], donde la planta presenta un contenedor de 45 cm³ llamado tanque de reserva que contiene el líquido a ser bombeado a través de la tubería y de regreso al contenedor, un transmisor ROSEMOUNT 8732E mide el volumen de flujo a través de un campo magnético dando un valor corriente estándar 4-20 mA equivalente a 10-40 LPM, el PLC utilizado es un CompactLogix L32E adicionalmente tiene una bomba centrífuga de ½ Hp como actuador que es controlada por un variador de frecuencia que tiene como entrada de 0-10V, la estación es mostrada en Fig. 6 con sus componentes.

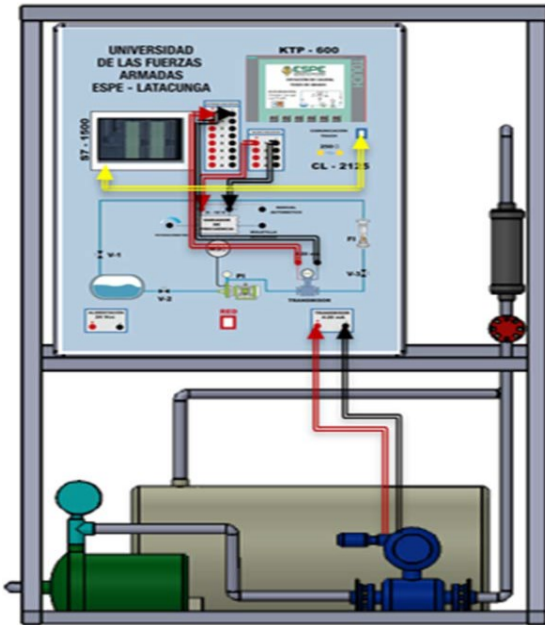


Fig. 6. Estación de flujo con sus elementos.

El modelo del sistema de flujo obtenido mediante la herramienta ident de Matlab tiene la siguiente función de transferencia

$$G(s) = \frac{1.1981}{1 + 0.2601s} e^{-0.3883s}$$

La Fig. 7 muestra la comparación de la respuesta del sistema obtenido mediante experimentación y la Tabla III muestra los parámetros de control e índices de desempeño, donde los resultados muestran que los métodos tradicionales son más rápidos en comparación con el método lambda. Sin embargo, el método lambda proporciona una respuesta sin oscilaciones.

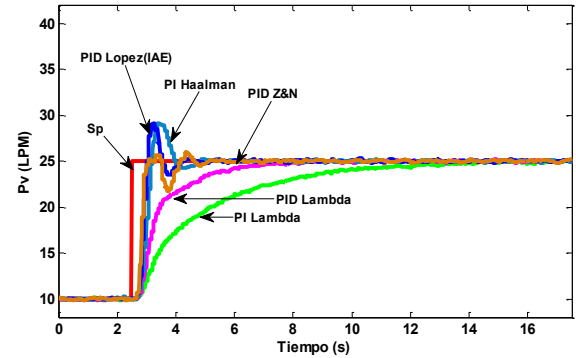


Fig. 7. Comparación de las respuestas del sistema de flujo con diferentes métodos de sintonía.

TABLA III. PARÁMETROS PI Y PID E ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Método	Parámetros				
	K_c	T_i (s)	T_d (s)	PEM (%)	IAE
PI Lambda	0.1858	0.2601	0	No overshoot	20.6294
PID Lambda	0.3891	0.4543	0.1112	No overshoot	21.8536
PI Haalman	0.3727	0.2601	0	16.3323	22.5370
PID Z & N	0.6709	0.7766	0.1942	3.6440	22.4949
PID Lopez IAE	0.7707	0.3422	0.1767	16.3157	22.5680

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo un software interactivo para la sintonización de controladores PI y PID ha sido presentado. La herramienta es muy útil para enseñar y aprender el método de sintonía lambda y compararlos con otros métodos convencionales. La implementación de las reglas de sintonía lambda en procesos de autorregulación da una respuesta sin sobre impulso permitiendo producir productos más uniformes a un menor costo. El método utiliza un parámetro denominado constante de tiempo en lazo cerrado cuya función es aumentar o disminuir la respuesta del sistema. Finalmente los resultados experimentales han verificado el buen desempeño de la herramienta presentada.

REFERENCIAS

- [1] J. Cvejn, "Simple PI/PID controller tuning rules for FOPDT plants with guaranteed closed-Loop stability margin," *Acta Montanistica Slovaca*, vol.16, no.1, pp. 17-25, 2011.
- [2] K. Hayashi and T. Yamamoto, "Design of a PID tuner based on generalized-output errors," *SICE Annual Conference 2011*, Tokyo, 2011, pp. 2614-2618.
- [3] Z. Yao and H. Chunqing, "IMC-PID tuning method for stable FOPDT processes with stochastic time delay," *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, 2014, pp. 1073-1078.
- [4] J. G. Ziegler, N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, no.11, pp. 759-768, 1942.
- [5] G. H. Cohen, G. A. Coon, "Theoretical consideration of related control," *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [6] W. Kolaj, J. Mozaryn and M. Syfert, "PLC-PIDTuner: Application for PID tuning with SIMATIC S7 PLC controllers," *2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Miedzydroje, 2016, pp. 306-311.
- [7] C.C. Yu, *Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach*, Springer, London, 2006.
- [8] P. Tatjewski, L. Trybus, M. Lawrynczuk, P. Marusak, Z. Swider, A. Stec, *Supervisory Control and Optimization, Modeling, Diagnostics and Process Control. Implementation in the DiaSter System*, Springer, London, 2011.
- [9] T. Olsen y B. Bialkowski, "Lambda Tuning as a Promising Controller Tuning," *Spring National Meeting*, New Orleans, 2002.
- [10] E.B. Dahlin. *Designing and tuning digital controllers*. Instruments and Control Systems, 41:77-83,1968.
- [11] Astrom, K.J., and Hagglund, T.: 'PID controllers: theory, design and tuning' (Instrument Society of America, 1995)
- [12] A.M. Lopez, J.A. Miller, C.L. Smith, P.W. Murrill, "Tuning Controllers with Error-Integral Criteria Instrumentation," *Technology*, 14 (1967), pp. 57-62.
- [13] A. Haalman, "Adjusting controllers for a deadtime process." *Control Engineering* 65 (1965): 71-73.
- [14] B. Vasu Murthy, Y. V. Pavan Kumar and U. V. Ratna Kumari, "Application of neural networks in process control: Automatic/online tuning of PID controller gains for $\pm 10\%$ disturbance rejection," *2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, Ramanathapuram, 2012, pp. 348-352.
- [15] Y. Luo, Z. Yue and S. Wang, "Application of Robust Control Theory to Main Steam Temperature of Circulating Fluidized Bed Boiler," *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 2009, pp. 1-4.
- [16] E. Pruna, V. H. Andaluz, L. E. Proaño, C. P. Carvajal, I. Escobar and M. Pilatásig, "Construction and analysis of PID, fuzzy and predictive controllers in flow system," *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, Curico, 2016, pp. 1-7.