

CONTROLADOR TIPO SERVO CON OBSERVADOR DE ORDEN COMPLETO Y CONTROLADOR SEGÚN CIANCONE MARLÍN PARA UN SISTEMA DE FLUJO

Luis Edo García Jaimes¹, Maribel Arroyave Giraldo²

¹Luis Eduardo García Jaimes, Magister en Educación, Especialista en automatización Industrial Docente Investigador, legarcia47@gmail.com. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

²Maribel Arroyave Giraldo, MSc(c) en Automatización y Control Industrial, Docente Investigador, maryarri@gmail.com. Institución Universitaria de Envigado, Carrera 27 B # 39 A Sur 57

RESUMEN

En el artículo se presenta el método de control de procesos por realimentación del estado utilizando técnicas de asignación de polos. Se diseña un observador de orden completo y se le adiciona un integrador para corregir el error en estado estable, además se calcula un controlador utilizando las tablas de Ciancone Marlín con el fin de comparar el desempeño de los dos controladores en la regulación del proceso. La variable controlada es el flujo y para ello se trabaja con un módulo didáctico diseñado y construido en el laboratorio de Automatización y Robótica de la Institución Universitaria de Envigado, que permite controlar y monitorear las variables de flujo y nivel. El módulo posibilita también, estudiar aspectos relacionados con el modelado e identificación de sistemas y aplicar distintas estrategias de control, incluyendo técnicas de control convencional y técnicas de control avanzado.

Palabras clave: Control de flujo, Algoritmo de control, Modelo matemático, Observadores de estado, Asignación de polos.

Recibido 29 de Marzo de 2010. Aceptado 23 de Junio de 2010
Received: March 29, 2010 Accepted: June 23, 2010

FULL ORDER STATE SERVO CONTROLLER AND CIANCONE MARLIN CONTROLLER FOR A FLOW SYSTEM

ABSTRACT

The paper the method of process control using state feedback and pole assignment techniques. Designing a full order observer and an integrator is added to correct the error in steady state, also is calculated a controller using Ciancone Marlin tables to compare the performance of the two controllers in the regulation of the process. The controlled variable is the flow and to this ends a training module designed and built in the Automation and Robotics Laboratory of the University Institution of Envigado, which allows controlling and monitoring the flow and level variables is used. The module also allows studying aspects of systems modelling and identification and applying different control strategies, including conventional control techniques and advanced control techniques.

Keywords: *Flow control, Control algorithm, Mathematical model, transducer, State observers, pole assignment.*

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería del Control Automático juega un papel fundamental en los sistemas y procesos tecnológicos modernos. Los beneficios que se obtienen con un buen control pueden llegar a ser enormes. Estos beneficios incluyen productos de mejor calidad, menor consumo de energía, minimización de desechos, mayores niveles de seguridad y reducción de la polución.

Los sistemas de control son fundamentales para el manejo de los procesos de producción de las plantas industriales. Está comprobado que el aumento de la productividad está muy relacionado con la automatización de los procesos en la medida que se haga un uso eficiente de los equipos y sistemas asociados.

Actualmente la tecnología permite establecer una serie de estrategias de control que eran de difícil implementación hasta hace solamente algunos años, en especial en procesos industriales complejos. Los nuevos desarrollos tecnológicos y los objetivos de control cada vez más ambiciosos hacen necesarios contar con estrategias de sistemas de control que tomen en cuenta las dificultades inherentes a la implementación práctica.

Los equipos y sistemas de instrumentación y control de última generación exigen al profesional responsable de los sistemas de control de una planta estar actualizado, especialmente en la evolución de equipamiento de tecnología digital, su aplicación en redes industriales y en la integración de los sistemas de planta con los sistemas administrativos.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para obtener resultados satisfactorios en el proceso enseñanza-aprendizaje de la teoría del control y sus aplicaciones a nivel industrial se precisa de tres elementos claramente definidos pero complementarios entre sí:

- La utilización de métodos analíticos para el análisis, diseño y evaluación de los sistemas de control.
- La propuesta de metodologías basadas en métodos semi-analíticos o numéricos, que

permitan analizar y diseñar leyes de control para sistemas con mayor complejidad.

- La implementación y evaluación de las propuestas sobre prototipos de laboratorio.

2.1 Módulo de control para el monitoreo de flujo y nivel

El módulo para monitoreo y control de flujo y nivel está diseñado para realizar prácticas de instrumentación industrial y experimentar sobre una extensa variedad de métodos y estrategias de control análogo y control digital en la regulación de procesos. Las estrategias de control incluyen desde control on-off y lazos de realimentación simples, hasta lazos de control por computador. El sistema está construido con elementos de aplicación industrial para que el estudiante se enfrente con problemas reales propios de los procesos de producción y de servicios.

Con el módulo de flujo y nivel se pueden realizar las siguientes prácticas:

- Medición de nivel.
- Control on-off.
- Control P, PI y PID analógico.
- Control P, PI, PID discretos.
- Identificación de sistemas.
- Aplicación de técnicas de control predictivo basado en modelos.
- Aplicación de técnicas de control adaptativo.
- Implementación de sistemas de control *fuzzy* y *neuro-fuzzy*.

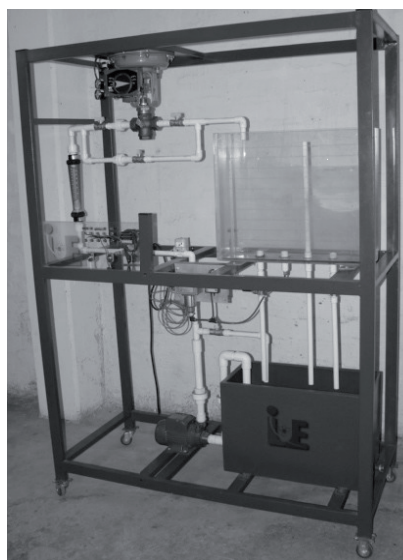


Fig.1. Módulo de flujo-nivel

2.2 Descripción del sistema

El módulo para control y monitoreo de flujo y nivel es un sistema de regulación de procesos que consta de dos tanques: uno ubicado en la parte inferior utilizado como reservorio de agua y otro en la parte superior destinado al control de nivel (Ver figura 1). Mediante una bomba se trasiega el agua desde el tanque inferior al tanque superior estableciéndose un sistema de recirculación de agua que permite realizar el control de flujo y el control de nivel.

El tanque superior tiene tres ductos de salida de agua hacia el tanque inferior: el primero tiene una válvula solenoide que permite realizar control on-off de nivel, el segundo tiene una válvula manual para introducir perturbaciones al lazo de control de nivel y el tercero, es utilizado como rebose para evitar

derrames de agua en caso de alguna falla en el sistema de control.

Para el control de flujo, ver figura 2, se dispone de: un transmisor de flujo, un controlador electrónico PID, un convertidor de corriente a presión, una válvula de control y una bomba para recirculación. También tiene un sistema de válvulas manuales que permiten introducir perturbaciones en el lazo de control de flujo.

Para el control de nivel, ver figura 2, se dispone de: un transmisor de nivel, un controlador electrónico PID, un convertidor de corriente a presión, una válvula de control y una bomba para recirculación. Además se cuenta con un interruptor de nivel y una válvula solenoide para control *on-off*.

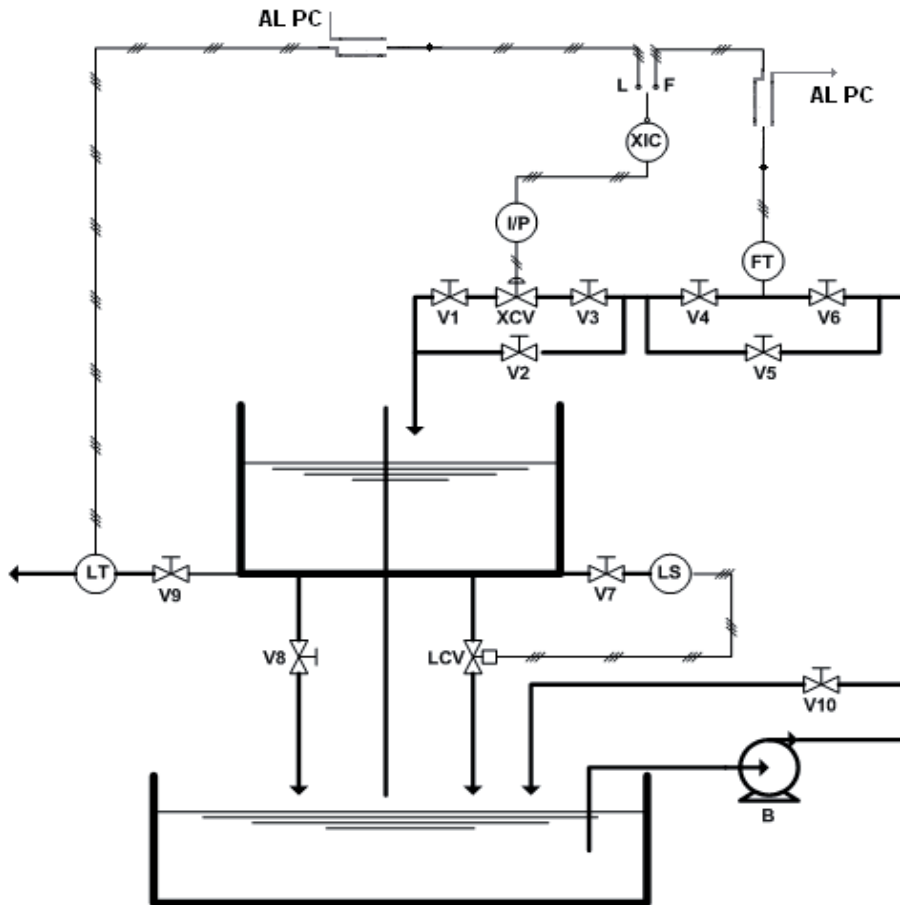


Fig. 2. Diagrama de instrumentación del módulo.

En la figura 2, el controlador electrónico XIC (controlador e indicador) es compartido: cuando está en la posición L recibe la señal proveniente del

sensor de nivel y controla el nivel en el tanque superior. Cuando se coloca en la posición F recibe la señal del transmisor de flujo y controla el caudal

a través del ducto. Esto se hace por economía pues ésta disposición exige solo un controlador en lugar de dos (uno para cada variable).

Las señales provenientes de los transmisores de nivel y de flujo se disponen en borneras de modo que se pueden llevar directamente al controlador electrónico PID ó se pueden llevar a una tarjeta de adquisición de datos para realizar control por computador ó a través de un PLC (Controlador Lógico Programable). De igual manera, las señales de control provenientes ya sea del controlador PID, del computador ó del PLC se pueden llevar al convertidor de corriente a presión (I/P) y de éste a la válvula de control (XCV). Ésta disposición permite aplicar diferentes técnicas de control de procesos: control análogo, control digital y control con PLC.

3. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE FLUJO

Para realizar el diseño de los controladores para el proceso de flujo se consideró que la función de transferencia que lo representa se puede aproximar a la de un sistema de primer orden con retardo (POR), de la forma:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K e^{-\theta' s}}{\tau S + 1} \quad (1)$$

En donde K =ganancia de la planta, τ = constante de tiempo, θ' =retardo o tiempo muerto, $y(t)$ es la salida del sistema y $u(t)$ es la entrada.

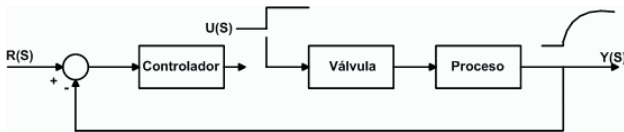


Fig. 3. Forma de aplicar el escalón para obtener la curva de reacción

El procedimiento experimental para estimar el modelo consiste en determinar el punto de operación del proceso, abrir el lazo de control (llevando el controlador a manual) antes del elemento final de control y crear un pequeño y rápido cambio en escalón que estimule el proceso como se indica en la figura 3. La respuesta obtenida permite estimar los valores de la ganancia

(K), de la constante de tiempo (τ) y el de el retardo (θ') del proceso [1].

Para modelar el sistema se aplicaron diferentes escalones como se ilustra en la figura 4.

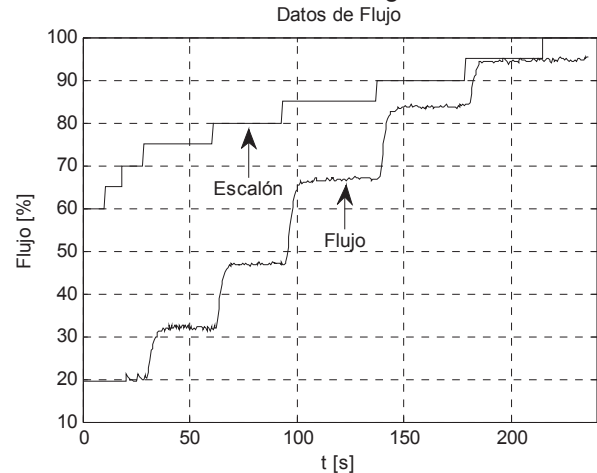


Fig. 4. Respuesta del sistema al escalón.

Para obtener el modelo matemático del sistema y realizar el diseño de los controladores, se tomó como zona de trabajo la comprendida entre el 47% y el 67% del flujo máximo. La figura 5 muestra la respuesta del sistema al escalón del 5% aplicado en dicha zona, para efectos de una correcta identificación, las condiciones iniciales se llevaron a cero mediante una simple traslación de los datos.

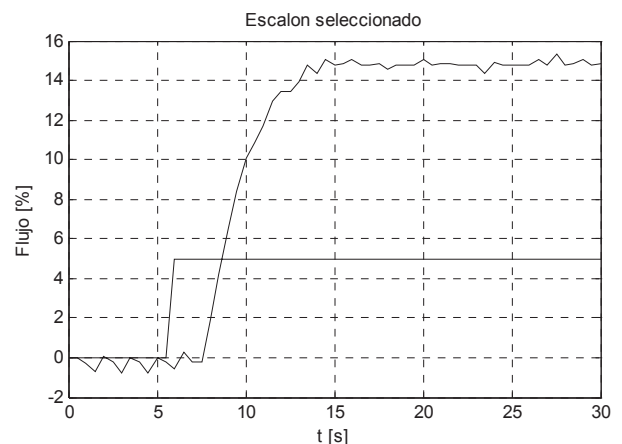


Fig. 5. Escalón seleccionado.

La identificación se realizó utilizando la plataforma MATLAB®, específicamente la sección System IdentificationTool, ver figura 6.

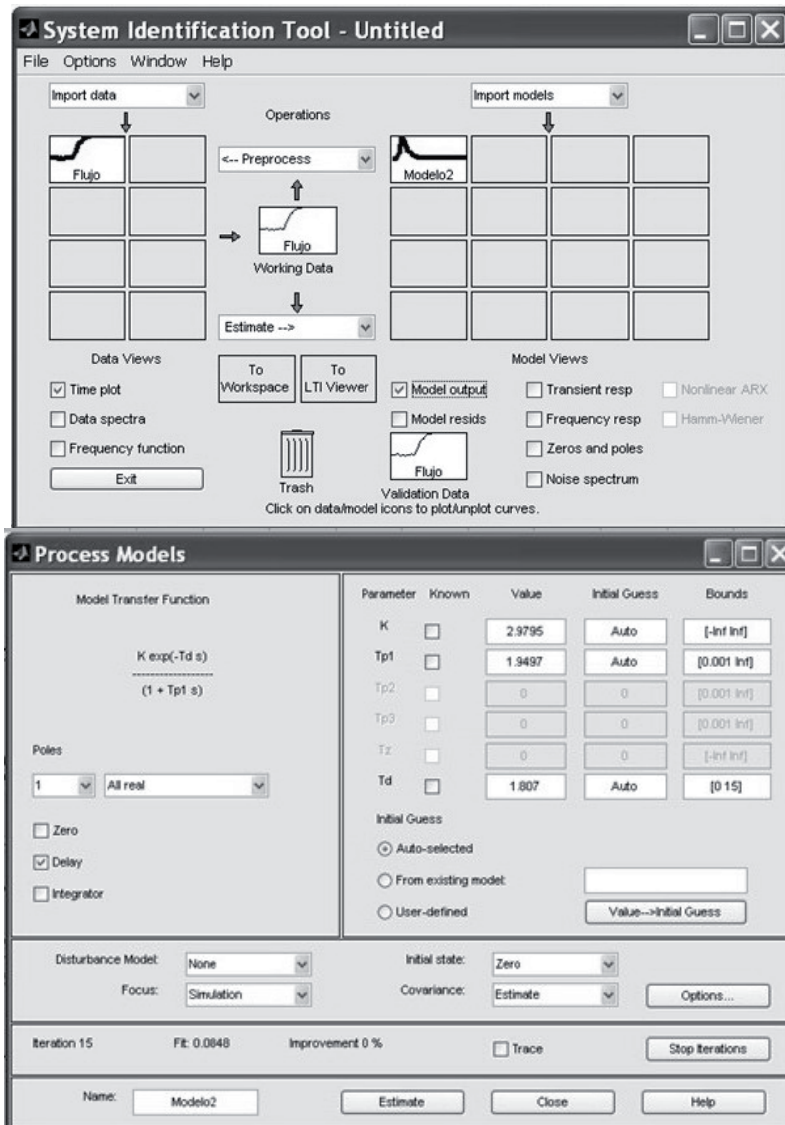


Fig. 6. Herramienta de Identificación.

El resultado fue un modelo de primer orden con retardo y función de transferencia dada por:

$$G_p(S) = \frac{2.9e^{-1.74S}}{2.15S + 1} \quad (2)$$

El tiempo en segundos.

En la figura 7 se presenta la validación del modelo obtenido.

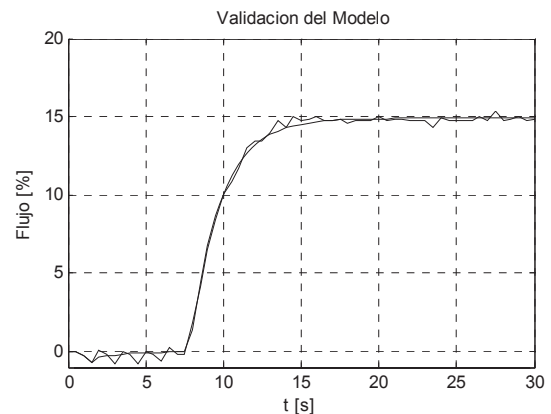


Fig. 7. Validación del modelo obtenido.

Para realizar el diseño de los controladores, el sistema se discretizó con un periodo de muestreo $T=1.74$ s, la función de transferencia de pulso resultante es:

$$HG(z) = \frac{1.609}{z(z - 0.4451)} \quad (3)$$

La representación del sistema en el espacio de estado en su forma canónica controlable está dada por la ecuación:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4451 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (4)$$

$$y(k) = [0 \quad 1.609] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

4. ALGORITMOS DE CONTROL

4.1 Sistema tipo servo con integrador y realimentación del estado

La figura 8 muestra un sistema de control por realimentación del estado en el cual se utiliza un integrador adicional para estabilizar adecuadamente el sistema y mejorar su exactitud.

La ecuación de estado de la planta y su correspondiente ecuación de salida son, respectivamente [2]:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (5)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (6)$$

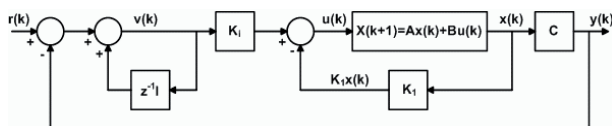


Fig. 8. Sistema tipo Servo con realimentación del estado

La ley de control para el sistema es:

$$u(k) = -K_1x(k) + K_i v(k) \quad (7)$$

$$v(k) = r(k) - y(k) + v(k-1) \quad (8)$$

Las ecuaciones (5), (7) y (8) se pueden escribir en forma matricial así:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ K_1 - K_1A - K_iCA & I - K_1B - K_iCB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_i \end{bmatrix} r(k+1) \quad (9)$$

La ecuación de salida del sistema es:

$$y(k) = [C \quad 0]x(k) \quad (10)$$

Si la referencia es un escalón de magnitud r , entonces $r(k+1) = r(k) = r$.

Con esta consideración, la ecuación (9) se puede escribir en la forma:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ K_1 - K_1A - K_iCA & I - K_1B - K_iCB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_i \end{bmatrix} r \quad (11)$$

Para realizar el diseño, utilizando la técnica de asignación de polos, se debe estimar la matriz K_i correspondiente al integrador y la matriz K_1 correspondiente a la matriz de ganancia de realimentación. Se puede demostrar que [3]

$$[K_1 \quad K_i] = [\hat{K} + [0 \quad I_m]] \left[\begin{array}{c|c} A - I_n & B \\ \hline CA & CB \end{array} \right]^{-1} \quad (12)$$

En donde:

$$\hat{K} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1] [\hat{B} \quad \hat{A}\hat{B} \quad \dots \quad \hat{A}^{n-1}\hat{B}]^{-1} \phi(\hat{A}) \quad (13)$$

y

$$\phi(\hat{A}) = \hat{A}^n + \alpha_1 \hat{A}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \hat{A} + \alpha_n I \quad (14)$$

Siendo $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ los coeficientes de la ecuación característica deseada para el sistema en lazo cerrado.

La ley de control para el sistema está dada por:

$$U(z) = [1 + K_1[zI - A + LC]^{-1}B]^{-1} \frac{[K_i z[R(z) - Y(z)] - K_1(z-1)[zI - A + LC]^{-1}LY(z)]}{z-1} \quad (15)$$

La matriz L del observador de orden completo se evalúa mediante la ecuación:

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

En donde:

$$\phi(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (17)$$

Siendo $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ los coeficientes de la ecuación característica deseada para el observador.

4.2 Control PI según Ciancone-Marlin

Este método de sintonía, para controladores PI y PID, se aplica cuando el modelo del proceso se aproxima a un sistema de primer orden con retardo (Sistema POR). Los parámetros para la sintonía se obtienen utilizando procedimientos de optimización basados en criterios de la integral del error como el IAE (Integral del valor absoluto del error) o el ICE (Integral del error cuadrático), teniendo en cuenta el desempeño y la robustez del algoritmo de control y los problemas de saturación de la variable manipulada [4], [5].

Sea el sistema de primer orden dado por la ecuación (1), para obtener los parámetros del controlador mediante la técnica de Ciancone - Marlin se utiliza la relación [6].

$$F = \frac{\theta'}{\theta' + \tau} \quad (18)$$

A partir de la cual se estiman los valores de K_c y τ_i del controlador, así:

$$X = K_c K Y = \frac{\tau_i}{\theta + \tau} \quad (19)$$

Para sistemas discretos: $\theta = \theta' + \frac{T}{2}$

El controlador PI tiene como ecuación [7]:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 z + q_1}{z - 1} \quad (20)$$

En donde:

$$\begin{aligned} q_0 &= K_c \left(1 + \frac{T}{2\tau_i}\right); \\ q_1 &= -K_c \left(1 - \frac{T}{2\tau_i}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

En la tabla 1 se dan los valores de F y los correspondientes valores de X y Y que permiten obtener los parámetros del controlador: K_c y τ_i .

Tabla 1. Método de Ciancone-Marlin

F	PI (Set - Point)		PI (Perturbación)	
	X	Y	X	Y
0.0	1.259	0.241	1.417	0.748
0.1	1.259	0.235	1.417	0.748
0.2	1.626	0.518	1.193	0.964
0.3	1.377	0.789	1.032	0.881
0.4	1.000	0.746	0.918	0.818
0.5	0.858	0.702	0.861	0.756
0.6	0.599	0.659	0.722	0.693
0.7	0.464	0.615	0.648	0.631
0.8	0.383	0.572	0.608	0.568
0.9	0.359	0.528	0.594	0.506
1.0	0.316	0.485	0.558	0.443

5. CÁLCULO Y PRUEBA DE LOS CONTROLADORES

Para implementar los algoritmos de control se utilizó la plataforma Labview y la interface entre el proceso y el computador se realizó con una tarjeta de adquisición de datos con resolución de 10 bits.

El software desarrollado, además de realizar el control del proceso, permite monitorear y almacenar los datos de la variable controlada y de la salida del controlador hacia el elemento final de control, esto posibilita disponer permanentemente de información sobre la evolución del sistema.

5.1 Sistema tipo servo con integrador

Para estimar el algoritmo de control del sistema tipo servo con integrador y realimentación del estado, se asumió para el proceso en lazo cerrado un tiempo de establecimiento igual a 5 s y máximo sobreimpulso del 8%. Estas condiciones ubican dos polos dominantes en $z = 0.589 \pm j0.32$, el polo restante se asigna en $z=0.2$. Para el observador se asignaron los polos en el origen.

Utilizando las ecuaciones (12), (13) y (14) se obtiene:

$$\begin{aligned} K_1 &= [0.0669 \quad 0.0898] \\ K_i &= [0.135] \\ L &= \begin{bmatrix} 0.123 \\ 0.276 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

La ley de control para el sistema es:

$$U(z) = \frac{0.135z^3 R(z) - [0.135z^3 + 0.0331z^2 - 0.0331z]Y(z)}{z^3 - 0.933z^2 - 0.0527z - 0.120} \quad (23)$$

La figura 9 muestra la simulación en Matlab del sistema de flujo con el controlador tipo servo estimado, la señal de referencia es un escalón unitario. Como puede observarse, el sistema cumple con las condiciones de diseño propuestas y el error de estado estable es igual a cero.

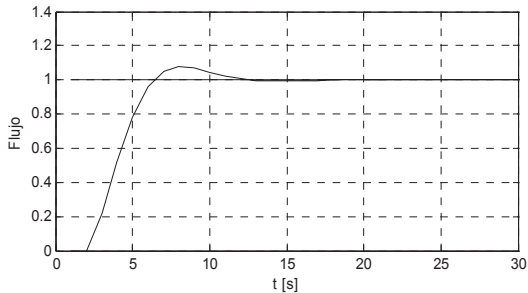


Figura 9 Simulación del sistema con el controlador tipo servo.

La figura 10 muestra la respuesta del sistema con el controlador tipo servo obtenido. Para realizar las pruebas del controlador se aplicaron escalones del 5% en la señal de referencia. Se observa que ésta presenta un sobreimpulso de aproximadamente 10%, con valor algo mayor al utilizado como criterio de diseño y que el tiempo de establecimiento es de unos 20 s. La figura 11 muestra el comportamiento del proceso cuando se le aplica una perturbación manipulando la válvula manual V5 (figura 2), equivalente a suministrar una entrada adicional de agua para aumentar el flujo en aproximadamente un 10%. Se observa como el sistema de control experimenta la perturbación introducida, la corrige y se estabiliza rápidamente retornando al punto de consigna

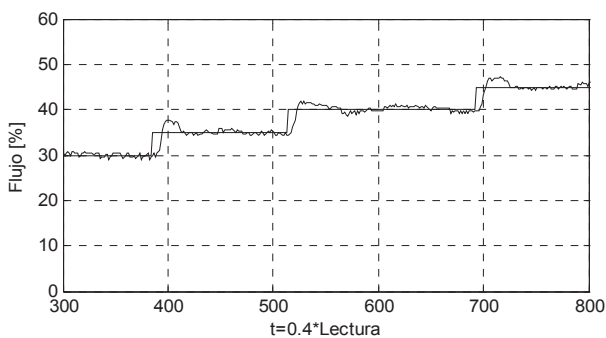


Fig. 10. Respuesta con el Sistema tipo servo con integrador.

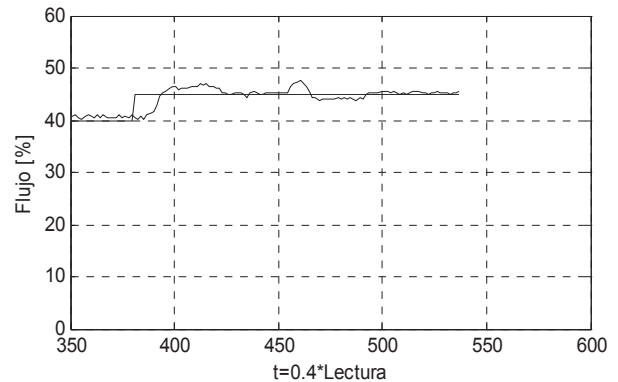


Fig 11. Aplicación de una perturbación al sistema tipo Servo.

5.2 Controlador PI según Ciancone-Marlin:

Según el modelo obtenido para el sistema y aplicando la ecuación (18):

$$F = 0.4473 \quad (24)$$

Utilizando la tabla 1 e interpolando resulta:

$$X = 0.9360 \quad Y = 0.726 \quad (25)$$

De la ecuación (19) se obtienen los parámetros del controlador PI, así:

$$K_c = 0.322 \quad \tau_i = 3.0 \quad (26)$$

El controlador PI, según las ecuaciones (20) y (21) tiene como función de transferencia:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.3496 - 0.2959z^{-1}}{z - 1} \quad (27)$$

La figura 12 muestra la simulación en Matlab del sistema de flujo con el controlador de Ciancone-Marlin calculado, la señal de referencia es un escalón unitario. Como puede observarse, el sistema presenta un sobreimpulso de aproximadamente el 7%, tiempo de establecimiento de 10 s y el error de estado estable es igual a cero.

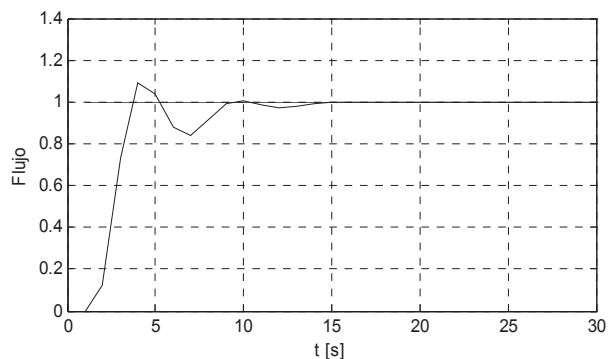


Figura 12 Simulación del sistema con el controlador de Ciancone-Marlin

La figura 13 muestra la respuesta del sistema real con el controlador PI de Ciancone-Marlin obtenido, Para realizar las pruebas del controlador se aplicaron escalones del 5% en la señal de referencia. Se observa como el sistema se estabiliza rápidamente ante los cambios aplicados en el Set-Point, sin oscilaciones significativas y con un sobreimpulso de aproximadamente el 8%. En la figura 14 se presenta la respuesta del sistema ante una perturbación introducida manipulando la válvula manual V5 (figura 2), equivalente a suministrar una entrada adicional de agua para aumentar el flujo en aproximadamente un 10%. Se observa como el sistema de control regula adecuadamente la perturbación introducida y retorna a su valor de consigna.

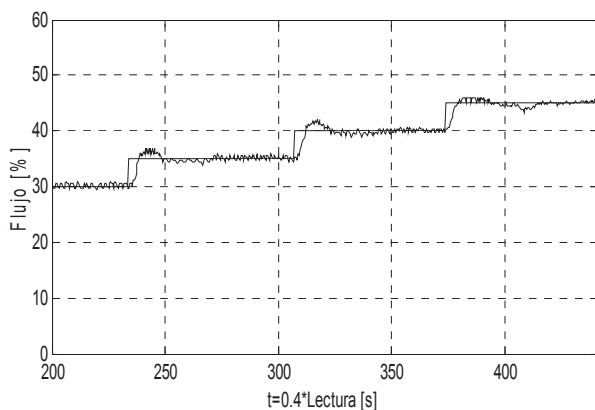


Fig. 13. Respuesta con el controlador PI según Ciancone-Marlin

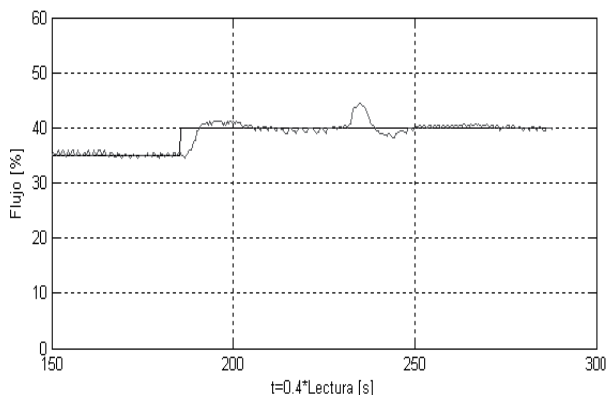


Fig. 14. Aplicación de una perturbación al sistema con el controlador PI Ciancone-Marlin

En la tabla 2 se muestran datos cuantitativos de las respuestas del sistema con los dos controladores, los parámetros mostrados corresponden al tiempo de establecimiento (t_{ss}), al máximo sobreimpulso (M_p %) y al error de estado estable (e_{ss}), los cuales

se toman como base para determinar el desempeño de cada controlador.

Tabla 2. Datos cuantitativos de las respuestas del sistema.

CONTROLADOR	t_s (s)	M_p (%)	e_{ss} (%)
TIPO SERVO	20	10	0
CINCONE-MARLIN	10	8	0

6. CONCLUSIONES

- Se diseñó un controlador tipo servo con integrador utilizando la técnica de asignación de polos y un controlador PI por el método de Ciancone –Marlin para controlar un sistema de flujo. La implementación de los algoritmos de control en el proceso real mostraron un buen desempeño en cuanto a estabilidad, exactitud y velocidad de respuesta se refiere.

- En el proceso real, el controlador tipo Servo logró estabilizar el sistema, con un sobreimpulso de aproximadamente 10%, en cuanto al tiempo de establecimiento, este resultado ser más lento que el controlador PI según Ciancone-Marlin. Frente a la perturbación, logra estabilizar al sistema retornando la variable controlada a su valor de referencia rápidamente, mostrando así un buen comportamiento ante la presencia de perturbaciones externas.

- En el sistema real, el controlador PI según Ciancone-Marlin, presenta menor tiempo de establecimiento y sobreimpulso de solo un 8%. El sistema después del primer pico no presenta oscilaciones y su comportamiento frente a la perturbación es conveniente pues elimina rápidamente el efecto adverso que ésta genera en la respuesta del sistema.

- Los resultados anteriores indican que el desempeño del sistema con los algoritmos de control PI según Ciancone-Marlin y con el controlador tipo servo con integrador no presenta diferencias significativas en cuanto a estabilidad, máximo sobreimpulso y error de estado estable se refiere, siendo más lenta la respuesta con el sistema tipo servo.

- La ley de control generada por los controladores es de fácil implementación en

software y presenta un bajo costo computacional. Con estas ventajas y los buenos resultados obtenidos en el desempeño del proceso de flujo se puede concluir que estas técnicas de control representan una buena opción para utilizarlas en la regulación de procesos industriales.

- El control por computador presenta un excelente desempeño en la ejecución de los algoritmos pues se aprovechan sus características en cuanto a velocidad de procesamiento matemático para la implementación de estos, dando como resultado que el proceso controlado responde correctamente de acuerdo a los parámetros estimados en cálculos previos.

- Cuando se desarrollo el cálculo matemático de los controladores se realizó una simulación en Matlab® obteniendo un buen desempeño en cuanto a estabilidad, exactitud y velocidad de respuesta de acuerdo a las características teóricas de los mismos pero, cuando fueron implementados en el proceso real, se presentaron algunas diferencias entre el comportamiento real del sistema y el obtenido en la simulación, lo que indica que a pesar de que la simulación es una herramienta muy poderosa a tener en cuenta, esta puede diferir del comportamiento real debido a imperfecciones en el modelo matemático estimado para el proceso y a la presencia de perturbaciones no tenidas en cuenta en la modelación.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Institución Universitaria de Envigado (IUE), por facilitar el laboratorio de Automatización y Robótica para la realización de las pruebas de campo e implementación de los algoritmos diseñados.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] García, J.L (2009). *Control digital. Teoría y práctica*. Politécnico colombiano. 2009. Pp 231-233

[2] Ogata, Katsuhico. (1996) *Sistemas de control en tiempo discreto*. Prentice Hall. México 1996. Pp 460-465

[3] Phillips, Charles. Nagle Troy (1995). *Digital control systems analysis and design*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. Pp 345-356

[4] Marlin, T. *Process Control: designing processes and control systems for dynamic performance*. Mc Graw Hill, Singapore. 1995

[5] Madhuranthakam, C.R. Elkamel, A. *Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes*. Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada.

[6] Ciancone, R. Marlin, T (1992). *Tune Controllers to Meet Plant Objectives*. *Control*. 5, 1992. Pp 51-57

[7] Iserman, Rolf (1981). *Digital Control Systems*. Springer Verlag. Heidelberg. Pp 74-86