

Control Difuso Aplicado a un Equipo para la Regulación de Caudal

William Torres Hernández¹, Rosalío Farfán Martínez¹, José A. Ruz Hernández², Ramón García Hernández², José L. Rullán Lara²

¹Universidad Tecnológica de Campeche, Carretera Federal 180 s/n, San Antonio Cárdenas, Carmen, Campeche. México. C.P. 24381. Tel: 01 (938) 3816700, ext. 121
{williantorreshernandez, farfan678}@hotmail.com

²Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56, #4 esq. Avenida Concordia, Col. Benito Juárez, Carmen, Campeche, México. C.P. 24180. Tel: 01 (938) 3811018, ext. 1700
{jruez, rghernandez, jrullan}@pampano.unacar.mx

Resumen—En este trabajo se presenta la caracterización de un equipo de control de flujo y la aplicación en tiempo real de un controlador PI difuso. La función de transferencia del sistema es obtenida mediante el método de la curva de reacción. El controlador PI difuso es comparado en tiempo real contra el desempeño de un controlador PI. Para realizar esta comparación se utiliza un índice de desempeño basado en el error. Los resultados muestran un mejor desempeño del controlador propuesto en este trabajo.

Palabras clave: PI, Control difuso, Caudal, Tiempo real.

I. INTRODUCCIÓN

Las medidas de caudal tienen una gran importancia dentro de los procesos ya que se utilizan habitualmente para control del proceso y para medidas de contabilidad (facturación, importación/exportación de productos, etc.), por lo que la selección de la mejor tecnología tiene una gran implicación. Así por ejemplo, los caudalímetros se utilizan para contabilizar productos dentro de la propia planta, con el exterior, etc. En cuanto al control de procesos, la medición de caudal es imprescindible para poder realizar control automático, así como para optimizar rendimientos en las unidades de producción aplicando balances de materia por esta causa los caudales deben medirse y controlarse cuidadosamente (Smith y Corripio, 2010).

Los sistemas difusos se utilizan en muchas aplicaciones científicas y de ingeniería, principalmente en el área del control automático y el reconocimiento de patrones. Los conjuntos difusos fueron introducidos por L. A. Zadeh a mediados de los años sesenta (Zadeh, 1965) para procesar datos afectados de incertidumbre no probabilística.

II. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

En la figura 1 se muestra un diagrama a bloques de la interconexión de los elementos empleados en este trabajo, estos son: un módulo regulador de voltaje PWM, una bomba de agua centrífuga, un sensor de caudal y una tarjeta de adquisición de datos la DAQ PCI6071E.

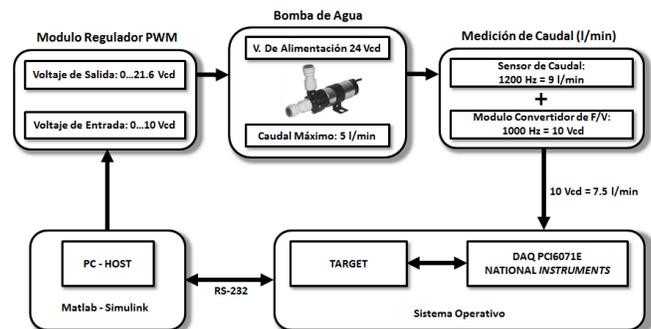


Figura 1. Diagrama a bloques de la conexión del equipo regulador de caudal.

Esta conexión es realizada para obtener datos de entrada y salida del proceso.

En la figura 2 se puede ver la bomba que se emplea en este trabajo, es una bomba centrífuga de la marca Johnson modelo CM30P7-1 número de pieza 10-24503-04 trabaja con un voltaje de 24 Vcd y proporciona un caudal máximo de 5 l/min.



Figura 2. Bomba Centrífuga proporciona un caudal máximo de 5 l/min.

En la figura 3 se muestra el modulo regulador PWM de la marca Kaleja modelo D-73553 es un convertidor cd-cd utilizado para controlar el voltaje aplicado a la bomba.



Figura 3. Modulo Regulador PWM (Convertidor de cd-cd).

En la figura 4 se puede apreciar el diagrama eléctrico de conexión.

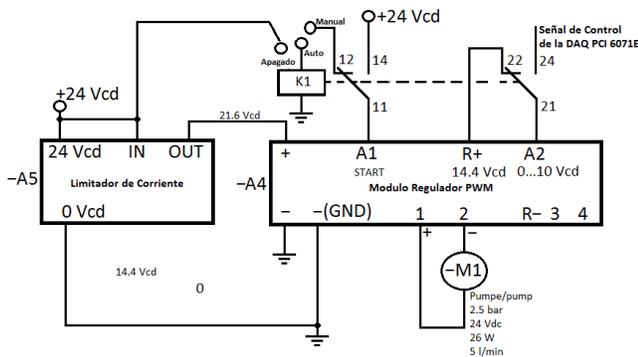


Figura 4 Diagrama eléctrico de conexión del módulo regulador PWM.

Cuando se le aplica una señal de 0-10 Vcd a la terminal A2 del módulo PWM, en su salida se presenta un voltaje de 0 a 21.6 Vcd, en la tabla 1 se muestra en detalle esta relación.

Voltaje aplicado en A2	Voltaje a la salida del regulador PWM
0	0
1	2.2
2	4.3
3	6.5
4	8.7
5	10.9
6	13

7	15.2
8	17.3
9	19.5
10	21.6

Tabla 1 Señal de voltaje aplicado en A2 y voltaje de salida del módulo regulador PWM.

En la figura 5 se muestra el sensor de caudal marca IR-Opflow Tipo 2 cuenta con rotor y evaluación optoelectrónica (infrarrojo), es un medidor de flujo volumétrico.



Figura 5 Sensor de Caudal tipo 2.

Su margen de medición es de 0.3-9.0 l/min y la gama de frecuencias de salida de 40-1200 Hz y un factor K de 8000 impulsos/dm³.

$$1200 Hz = 9 l/min \quad (1)$$

El sensor de caudal tiene como señal de salida una frecuencia proporcional a la cantidad de litros por minutos por lo que es necesario emplear un convertidor de frecuencia a voltaje. Por diseño del convertidor v/f la frecuencia de entrada máxima que se le puede aplicar al sensor es de 1000 Hz proporcionando en su salida 10 Vcd.

$$1000 Hz = 10 Vcd \quad (2)$$

En base a ecuación (1) y (2) el caudal máximo que se puede medir es de:

$$1000 Hz \left(\frac{9 l/min}{1200 Hz} \right) = 7,5 l/min \quad (2)$$

Por lo que se obtiene la siguiente relación:

$$10 Vcd = 7,5 l/min \quad (3)$$

El voltaje máximo que proporcionara el convertidor de frecuencia a voltaje con un flujo de 5 l/min es de:

$$5 l/min \frac{10 Vcd}{7,5 l/min} = 6.66 V \quad (4)$$

debido a esto no hay riesgo de saturación del sensor y del convertidor.

En la figura 6 se muestra el equipo empleado para llevar a cabo el control de flujo el cual cuenta con un solo tanque en

donde recirculará el agua para tener un flujo continuo.



Figura 6. Equipo empleado para el control de caudal.

III. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA: CURVA DE REACCIÓN

Se pretende obtener una función de transferencia representativa de la planta, esto es obteniendo datos de la señal de salida con la tarjeta de adquisición de datos PCI 6071E de National Instruments y el empleo del software MATLAB el tiempo de muestreo empleado es de 0.01 segundos (Aguado y Martínez, 2003).

En la figura 7 se muestra un diagrama a bloques que permite obtener la señal del sensor de caudal en función de l/min, siendo esto una configuración en lazo abierto.

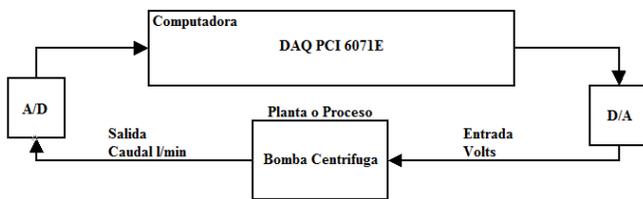


Figura 7. Diagrama a bloques para obtener señales de entrada-salida.

El proceso a controlar corresponde a un sistema de primer orden cuya función de transferencia en lazo abierto tiene la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (5)$$

después de varias pruebas se determina la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.441 e^{-0.12s}}{1.254s + 1} \quad (6)$$

En la figura 8 se aprecia la comparación de la curva de reacción del proceso y la curva de la función de transferencia.

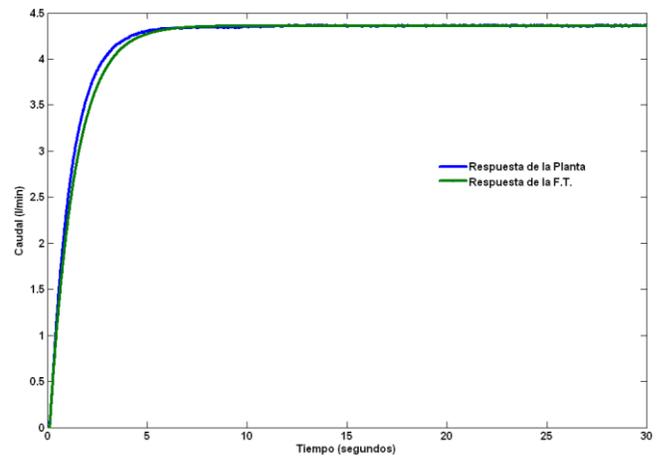


Figura 8. Comparación entre la señal de respuesta de la función de transferencia y la respuesta de la planta.

IV. DISEÑO DEL CONTROLADOR PI Y EL CONTROLADOR PI DIFUSO

a) Controlador PI

El Método para el diseño del controlador PI es el de Ziegler-Nichols con los valores de T y L que se obtuvieron de la función de transferencia se aplican las formulas de la tabla 2 para calcular el tipo de controlador PI.

Tipo de Controlador	Kp	Ki	Kd
PI	0.9T/L = 9.405	L/0.3 = 0.4	

Tabla 2 valores de PI calculados.

Para este trabajo se aplica un PI que es el más apropiado para un sistema de control de caudal (Hernández, 2010). Haciendo la sintonización del controlador PI se obtienen los valores de Kp=9 y Ki=6 con lo que se logra un mejor desempeño del controlador. En la figura 9 se muestra el esquema para aplicar en tiempo real el controlador PI.

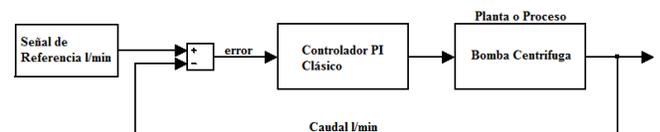


Figura 9. Diagrama a bloques para aplicar en tiempo real el controlador PI.

En la figura 10 (a) se muestra la respuesta de la planta para una señal de referencia de 3 l/min, con la aplicación de una perturbación. La señal de control se puede observar en la figura 10 (b) la señal de error se aprecia en la figura 10 (c).

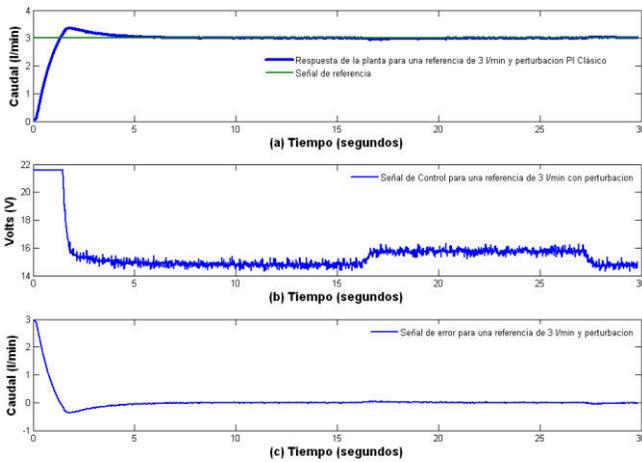
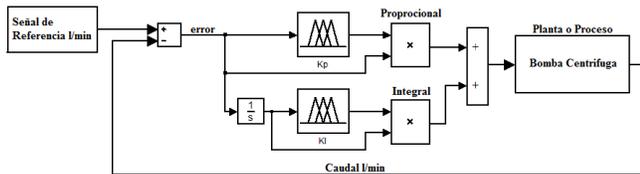


Figura 10 Respuesta de la planta con control PI en tiempo real y aplicando una perturbación.

b) Controlador PI Difuso

Se emplea el método de Ziegler-Nichols para calcular las ganancias pero en este caso estas son calculadas a través de un controlador difuso que utiliza como entrada el error y la integral del error (Ponce, 2010) esto se puede ver en el diagrama a bloques de la figura 11.



En la figura 11 Diagrama a bloques del controlador PI difuso.

El controlador proporcional difuso usa como entrada el error y como salida el valor de K_p , la función de Membresía del error emplea 5 funciones gaussianas en un universo de discurso de -1 a 4 etiquetadas como negalto, negmed, cero, posmed, posalto y para la salida K_p tres funciones triangulares con un universo de discurso de -1 a 30 etiquetadas como cero, medio, alto ver figura 12.

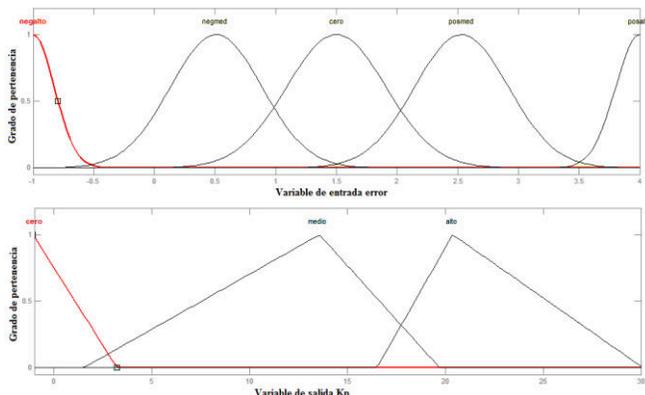


Figura 12. Funciones de membresía del controlador proporcional difuso.

El controlador integral difuso usa como entrada el error y como salida el valor de K_i , la función de membresía de la integral del error emplea 5 funciones gaussianas en un universo de discurso de -1 a 4 etiquetadas como negalto, negmed, cero, posmed, posalto y para la salida K_i tres funciones triangulares con un universo de discurso de 0 a 20 etiquetadas como cero, medio, alto ver figura 13.

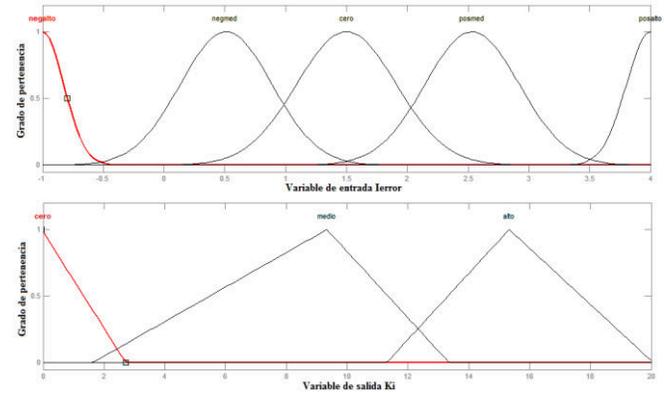


Figura 13 Funciones de membresía del controlador integral difuso

Las reglas difusas para las ganancias K_p y K_i son:

		K_p
E TOR	negalto	alto
	cero	cero
	posalto	alto
	negmed	medio
	posmed	medio

Tabla 3. Reglas difusas del controlador Proporcional

		K_i
E TOR	negalto	alto
	cero	cero
	posalto	alto
	negmed	medio
	posmed	medio

Tabla 4. Reglas difusas del controlador Integral

c) Controlador PI Difuso aplicado en tiempo real con perturbación.

En la figura 14 (a) se muestra la respuesta de la planta para una señal de referencia de 3 l/min, se le aplica un perturbación. La señal de control se puede observar en la figura 14 (b) el voltaje aplicado a la bomba aumenta cuando se presenta la perturbación, la señal de error se aprecia en la figura 14 (c).

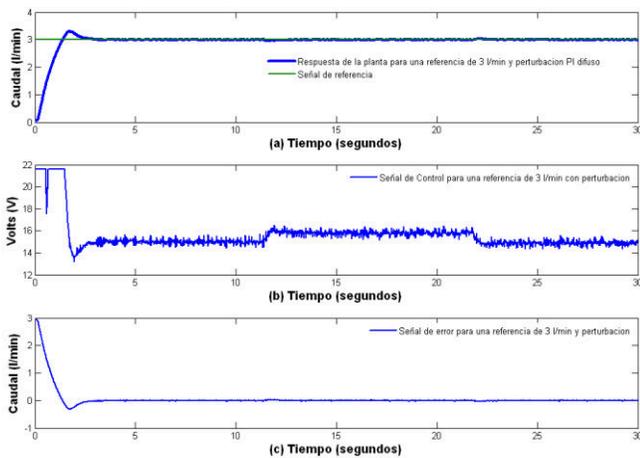


Figura 14. Respuesta de la planta con control PI difuso en tiempo real y aplicando una perturbación.

En la figura 15 se muestran el comportamiento de la planta cuando se le aplica el controlador PI clásico y el controlador PI difuso.

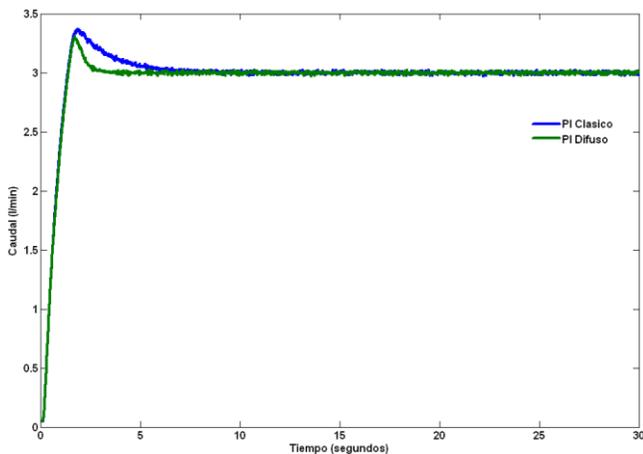


Figura 15. Se compara en tiempo real el controlador PI clásico con el controlador PI difuso.

Se utilizan un criterio de desempeño para evaluar el seguimiento; la integral del valor absoluto del error (IAE), ecuación (7)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (7)$$

	Controlador PI Clásico	Controlador PI Difuso
IAE Simulación	3.078	2.57
IAE Tiempo real	2.757	2.27

Tabla 5. IAE

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se puede ver la forma en que se puede construir un equipo de control de flujo empleando ciertos dispositivos que facilitan el poder manipularlos, con una

tarjeta de adquisición de datos, esto es de gran importancia sobre todo cuando no se conoce de manera concreta la dinámica de la planta, con la curva de reacción se puede obtener una función de transferencia y a partir de esta hacer el diseño de los controladores y poder probarlos en simulación para posteriormente aplicarlos al proceso en tiempo real. El controlador PI difuso mostro mejor índice de desempeño frente a el PI clásico así como una respuesta más rápida para alcanzar la señal de referencia.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Campeche por el apoyo recibido para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Smith, C. A., y Corripio, A. B. (2010). Control Automático de Procesos Teoría y Práctica. México: Limusa S.A de C.V.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. Information and control, 8, 338-353.
- PCI E series user manual, Multifunction I/O boards for PCI bus computer, January 1999, edition part number 320945D-01, National Instrument Corporation all rights reserved.
- Aguado, A. y Martínez, M., (2003); Identificación y control adaptativo, 1ª edición, 37-84, Prentice-Hall, Madrid, España.
- Hernández G. R. (2010). Introducción a los Sistemas de Control: Conceptos, Aplicaciones y Simulación con MATLAB. México: Pearson Educación.
- Ponce P. C. (2010). Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V.