

# Controlador difuso mejorado para estrategias de control en cascada y por acción anticipada

## An improved fuzzy logic controller for cascade and feedforward control strategies

Azuaje, Ivana<sup>1</sup>; Miranda, Moira<sup>1</sup>; Iglesias, Edinzo<sup>1</sup>; Camacho, Oscar<sup>2,3</sup>; García, Yohn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. ULA. Mérida 5101, Venezuela.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. ULA. Mérida 5101, Venezuela

<sup>3</sup>Departamento de Automatización y Control Industrial. Escuela Politécnica Nacional. Quito 170517, Ecuador

\*yohn@ula.ve

### Resumen

*La mayoría de los procesos industriales involucran retrasos y no linealidades. Los sistemas de control convencionales basados en modelos matemáticos no proporcionan respuestas satisfactorias en muchos casos. Los sistemas de control basados en lógica difusa han demostrado ser una opción apropiada para hacer frente a la complejidad de los procesos reales. Este trabajo tiene como objetivo mejorar el rendimiento del controlador difuso FCIV (Controlador Difuso con Variable Intermedio) desarrollado por García (2006), el cual presenta un excelente rendimiento para la estrategia de control en cascada, pero ineficiente cuando se enfrenta a otros tipos de perturbación. Aquí se obtuvo una función de transferencia que relaciona el valor deseado de la variable intermedia (set point intermedio) y un cambio en una perturbación dada. El valor del set point intermedio obtenido de esta manera, maneja adecuadamente la variable intermedia para hacer frente a la perturbación. Los resultados muestran cómo el FCIV modificado supera las actuaciones de controladores PID sobre las estrategias convencionales: en cascada y control anticipativo, incluso el FCIV inicialmente diseñado por García en 2006.*

**Palabras Claves:** Lógica difusa, control de procesos, control en cascada, control por acción anticipada.

### Abstract

*Most of Industrial processes involve time delays and nonlinearities. The conventional control systems based on mathematical models do not provide satisfactory responses in a lot of cases. Control systems based on fuzzy logic have shown to be an appropriate choice to deal with the complexity of the real processes. This work aims to improve the performance of fuzzy controller FCIV (Fuzzy Controller with Intermediate Variable) developed by Garcia (2006) which presented an excellent performance for cascade control strategy, but inefficient when facing other kind of disturbances. Here a transfer function that relates the set point from the intermediate variable and a given disturbance change was obtained. The intermediate set point value obtained from this way, properly handles the intermediate variable to face the disturbance. Results show how the modified FCIV overcomes the PIDs performances on conventional control strategies: cascade and feedforward control, even the FCIV initially designed by Garcia in 2006.*

**Keywords:** Fuzzy logic, process control, cascade control, feedforward control

## 1 Introducción

Las plantas químicas estructuralmente están compuestas por múltiples equipos de operaciones unitarias, integrados de manera sistemática y racional. Estas plantas tienen como objetivo principal la transformación de ciertas materias primas en uno o varios productos deseados, sin embargo, también deben satisfacer múltiples requerimientos tanto de seguridad, especificaciones de productos, regulaciones ambientales, restricciones operacionales, de mercadeo y demanda final. Todos estos requerimientos deben ser monitoreados y controlados con el fin de garantizar los objetivos operacionales (Stephanopoulos 1984).

Los enfoques computacionales respecto a la toma de decisiones tienen múltiples aplicaciones en el campo de la ingeniería y el control de procesos. Las estrategias de control con lógica difusa, cumplen con las mismas funciones de los controladores convencionales, pero son ideales para sistemas complejos de control, como por ejemplo el control no lineal de procesos (Erdei y col., 2011).

En 1964 la idea básica de sistemas lógicos difusos fue introducida y desarrollada por Lofti Zadeh (Zadeh 1965). En 1999 E. Mamdani col, desarrollaron una estrategia de control basado en lógica difusa (FLC) para un sistema de generación de vapor (Mamdani y col., 1975). A medida que aumenta la complejidad de los procesos y/o sistemas controlados los investigadores concentran sus esfuerzos en ofrecer algoritmos de control simples y fáciles de manejar.

La mayoría de los procesos industriales involucran retrasos y no linealidades, por lo que los sistemas de control convencional basados en modelos matemáticos no proporcionan soluciones muy satisfactorias en la mayoría de los casos. El controlador de lógica difusa no está basado en modelos matemáticos, y es ampliamente usado para la solución de problemas altamente no lineales (Sharma 2014). La lógica difusa busca describir aproximaciones matemáticas a partir de datos imprecisos, puede ser descrita como “una estimación con palabras en vez de números” (Iglesias 2002).

Las estructuras de control por retroalimentación (Feedback control) son ampliamente usadas en las industrias de procesos. Para la toma de decisiones los controladores involucrados en este tipo de estructuras realizan un cálculo en base a la diferencia entre la variable controlada y el punto de control (Smith y col., 2004). La principal desventaja del control por retroalimentación es que reacciona luego de que el proceso ha sido perturbado, y en los procesos con dinámicas lentas y múltiples perturbaciones el desempeño que provee esta estructura se vuelve inaceptable. Es necesario en estos casos utilizar otras estrategias de control avanzado para la obtención del desempeño requerido (García 2006).

Mientras que el control por retroalimentación busca

compensar las inexactitudes del modelo del proceso y el efecto de las perturbaciones no medidas a partir de una señal de error como entrada al sistema, el control por acción anticipada (Feedforward control) se usa para generar “acciones preventivas” con el fin reducir los efectos de las perturbaciones medibles que entran al sistema sobre la variable controlada. Este tipo de control requiere la medición de las perturbaciones antes de que entren a proceso, calculando el valor requerido de la variable manipulada para mantener la variable controlada en el valor que se desea o punto de control (Smith y col., 2004).

Otra estrategia ampliamente usada es el control en cascada, determinado por otro punto de medida en el sistema y un segundo controlador Feedback (esclavo), este recibe una señal (set point del esclavo) proveniente de un controlador principal (maestro). El control en cascada tiende a incrementar la estabilidad del sistema. El ciclo interno debe tener una dinámica más rápida que el primario. En general se usan controladores P o PI en el esclavo y PI o PID pero pudieran usarse también PI en ambos controladores. Por el otro lado, en el año 2006 Yohn García desarrolló un nuevo controlador difuso con variable intermedia (FCIV), para control en cascada, partiendo de la adición de un conjunto de reglas de lógica difusa para controlar una variable intermedia a un controlador convencional FLC, obteniendo un desempeño con alta estabilidad y robustez en comparación con otros tipos de controladores.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseñar un controlador difuso versátil que sea utilizable tanto para la estructura de control en cascada, como para el control por acción anticipada, que además garantice la estabilidad del sistema, emulando la efectividad obtenida por el controlador FCIV. Para ello se hará uso de la lógica difusa como herramienta de inteligencia artificial con módulos difusos de tipo Mamdani y funciones de transferencia que modifiquen el set point de la variable intermedia acorde con los cambios en una perturbación dada. El desempeño del nuevo controlador inteligente es comparado con las estrategias de control avanzado antes mencionada.

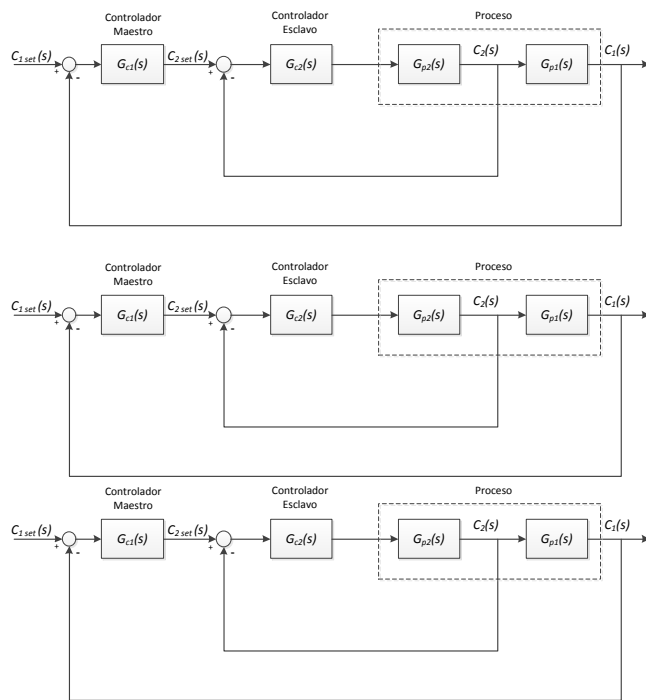
## 2 Control Avanzado de Procesos

La estrategia de control por retroalimentación es la más simple y más utilizada en los sistemas industriales, la consiste básicamente en la aplicación de una acción correctiva luego de que la variable controlada presenta una desviación en el set point. Sin embargo, este tipo de estrategias carece de acciones predictivas para compensar los efectos generados por las perturbaciones que entran al sistema y no se ejerce la acción correctiva hasta que dichas perturbaciones no se propaguen a lo largo del proceso, además de ser poco eficientes cuando la perturbación es de diferente naturaleza a la variable intermedia, en esto radica su principal desventaja. Por otro lado, a medida que los

sistemas se vuelven más complejos, no se logra llegar de manera satisfactoria al estado estacionario, entonces se hace imprescindible del uso de estrategias de control avanzados como por ejemplo el caso de control en cascada que utiliza la información de variables intermedias, y el control por acción anticipada que disminuye el efecto negativo de las perturbaciones antes de que estas atraviesen el proceso; entre otras estrategias de control avanzado.

### 2.1 Control en cascada

Una de las estrategias de control avanzado a usar en la presente investigación es el control en cascada, usualmente es requerida en procesos que pueden ser divididos en dos o más segmentos realizando la medición de una o más variables intermedias. La estructura que puede calificarse como clásica para el control en cascada presenta dos lazos simples representados en la Fig. 1, para los cuales debe diseñarse de forma individual y secuencial las funciones de transferencia a las que responden los controladores en cada lazo, comenzando desde el lazo más interno (Maffezzoni y col., 1990).



muestra las funciones de transferencia que rigen el proceso,  $G_{p2}(s)$  y  $G_{p1}(s)$ , pertenecen cada una un bucle de control diferente, en los cuales se busca garantizar la estabilidad de las variables con la implementación de dos controladores. La interacción mínima en ambos lazos de control al igual que una dinámica más rápida en el controlador interno debe garantizarse para mejorar la efectividad de la estructura.

### 2.2 Control por acción anticipada

En la práctica existen procesos que no toleran desviaciones temporales de las variables controladas respecto a los valores de deseados establecidos, por lo que el control por retroalimentación pierde su efectividad y se hace necesario el uso de una técnica de control más avanzada. El control por acción anticipada, el cual denominaremos por FF (feedforward control), tiene como principio la corrección de las perturbaciones principales en el sistema antes de que estas le afecten; dichas perturbaciones deben ser cuantificables, de forma tal que pueda ser determinado su efecto sobre la variable de respuesta. Esta estrategia puede ser combinada con el control por retroalimentación, de la manera más ideal puede eliminar todo tipo de efecto medido en la salida del proceso, incluso cuando existen errores de

modelado el control por acción anticipada puede reducir en gran medida dichos efectos en comparación al uso de sólo control por retroalimentación. En la fig.2 se puede observar el sistema combinado de control, donde  $G_c(s)$  es la función de transferencia del controlador Feedback y  $C_f(s)$  es la función de transferencia del controlador Feedforward;  $G_d(s)$  permanece como la función de transferencia entre la salida  $C(s)$  y la perturbación  $D(s)$ , mientras que  $G_p(s)$  es la función de transferencia entre la salida y la variable manipulada  $M(s)$  (Marchetti y col., 2004).

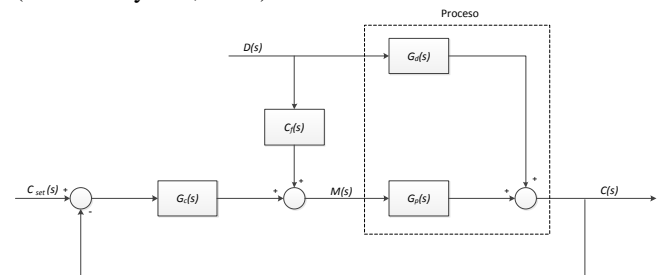


Fig. 2. Estructura de control por acción anticipada

### 2.3 Control usando Lógica difusa

El desempeño de los sistemas de control convencional para procesos no lineales se ve afectado por la imposibilidad de obtener una representación matemática satisfactoria del proceso; esto implica utilizar una herramienta de computación inteligente como la lógica difusa que permita llevar a cabo un mejor control que los proporcionados por métodos convencionales en este tipo de procesos complejos.

La idea básica de sistemas difusos fue introducida y desarrollada por Zadeh en el año 1964, cuando planteó la teoría de conjuntos difusos, en el artículo titulado "Fuzzy sets", desde entonces se han realizado múltiples investigaciones que contribuyen al acelerado progreso de esta teoría, y muy particularmente, en el desarrollo de nuevas técnicas de control no convencional.

La lógica difusa puede ser definida como una generalización de la lógica tradicional, utilizando expresiones que no son totalmente falsas o verdaderas, es decir, no asume dos valores únicos antagónicos sino que es aplicada a diferentes valores en un determinado rango, que va desde un valor mínimo hasta un valor máximo tomando una graduación de valores intermedios en términos lingüísticos como ejemplo: muy poco, poco, más o menos, mucho (Maguiña 2010). Esta lógica está basada en reglas heurísticas, por lo que los sistemas de control basados en lógica difusa procesan información imprecisa de acuerdo a reglas preestablecidas que identifican los procesos a controlar. En muchos de estos sistemas no lineales existen dos fuentes: los humanos expertos con un sistema de lenguaje natural y los modelos matemáticos derivados de leyes físicas, es por ello que los sistemas de control difuso se enfocan en transformar la base lingüística humana en expresiones matemáticas (Tremante y col., 2014). Los sistemas de control de lógica difusa por lo general consisten en cuatro partes principales: la interfaz de fuzzificación, la base de reglas difusas, el dispositivo de inferencia difusa y la interfaz de defuzzificación, tal como se muestra en la fig. 3.

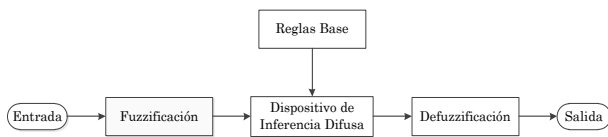


Fig. 3. Arquitectura de un sistema de control difuso.

La técnica de inferencia borrosa que comúnmente se usa es el método de Mamdani (Mamdani y col., 1975) fue propuesta, por Mamdani y Assilian, como el primer intento controlar una máquina de vapor y caldera mixta mediante la síntesis de un conjunto de reglas lingüísticas de control obtenidas a partir de los operadores humanos con experiencia, su trabajo fue inspirado por una publicación igualmente influyente de Lofti Zadeh.

A medida que se avanza en la investigación de procesos, la necesidad de nuevas técnicas de control automático va en aumento. Los esfuerzos se concentran en mejorar el desempeño de los controladores industriales, para ello se requiere estudiar los sistemas complejos basado en técnicas de computación inteligente, aunadas a estrategias de control avanzado.

Las estructuras de control en cascada y por acción anticipada son ampliamente usadas, ya que proporcionan el desempeño que el control por retroalimentación no provee para algunas aplicaciones, esto abre un amplio campo de posibilidades en el área investigativa para la mejora de procesos.

En el año 2006 García Y., desarrolló un nuevo controlador difuso con variable intermedia (FCIV), para control en cascada. Partiendo de la adición de un conjunto de reglas de lógica difusa y de una variable intermedia a un

controlador convencional FLC. Para esto García (2006), propuso un proceso químico altamente no lineal que consta de un tanque de precalentamiento con vapor y un reactor endotérmico, sobre el cual evaluaría el controlador propuesto (FCIV), obteniendo un desempeño con alta estabilidad y robustez en comparación con otros tipos de controladores. Por otro lado, la lógica difusa también ha sido integrada a estrategias de control por acción anticipada en múltiples estudios; Previamente, en el año 2003 Xiaoming, L. estudia un sistema de control de nanoposicionamiento. Con el fin de mejorar estos sistemas de alta precisión se hizo uso de un controlador adaptativo PI con un lazo de acción anticipada basado en lógica difusa; la parte integral del controlador garantiza exactitud en el nivel de control manométrico eliminando el error respecto al estado estacionario, mientras que un término de acción anticipada sobre la salida del PI permite que el controlador reaccione de manera más rápida ante los estímulos, mientras que un controlador difuso ajustará las ganancias del PI y de la acción anticipada para adaptarse al cambio del comportamiento dinámica causado por la variación de tiempo y las propiedades no lineales inherentes a los sistemas de posicionamiento.

En el 2011 Vilanova y colaboradores realizaron un trabajo investigativo referido a la remoción de Nitrógeno en plantas de tratamiento de aguas residuales con ayuda del control de procesos que integraba la estructura en cascada con acción anticipada, obteniendo resultados satisfactorios con respecto a la remoción del Nitrógeno total presente.

Sung-Kwun Oh y col., 2011 realizaron investigaciones para el diseño de un controlador PD difuso en cascada, haciendo uso del sistema Ball & Beam, para ello emplearon dos controladores PD difusos con parámetros optimizados haciendo del algoritmo de optimización por nube de partículas, PSO (a partir de sus siglas en inglés).

Por otra parte, en 2014 Zhaohong Ding y col., presentan su trabajo titulado: “Sistema de control difuso en cascada para péndulo invertido basado en funciones del tipo Mamdani-Sugeno”, en este proponen el diseño de un nuevo tipo de control difuso en cascada, en el cual el controlador tipo Sugeno se utiliza para monitorear el ángulo de giro del péndulo; mientras que el controlador difuso tipo Mamdani se utiliza en el bucle externo en la manipulación de desplazamiento del carro, obteniendo resultados de control estable y preciso con rapidez en el ajuste dinámico.

La propuesta de un sistema de respuesta rápida usando un lazo de acción anticipada para controladores difusos sintonizados, elaborada por Tharangini y col., 2014, se basó en el control de un sistema de calentamiento, con el fin de obtener un nuevo controlador que regulase la temperatura del vapor, que estuviera en la capacidad de obtener de manera satisfactoria las características de la dinámica del proceso dando un seguimiento efectivo de los cambios en los parámetros con una recuperación rápida de la señal de salida durante el período en el que ocurre la perturbación.

### 3 El controlador FCIV modificado

El presente trabajo de investigación pretende mejorar el controlador diseñado por García en 2006, el controlador difuso con variable intermedia (FCIV), integrándole un módulo que permita activar el FCIV adecuadamente para enfrentar perturbaciones de naturaleza diferente a la variable intermedia, manteniendo así la robustez y efectividad tanto para el control en cascada como para el control por acción anticipada.

#### 3.1 El Controlador FCIV

El FCIV original está conformado por dos módulos difusos. El primer módulo (FLC) se encarga de regular el error de la variable controlada primaria  $e(s)$  y su cambio  $\Delta e(s)$ , mientras que el segundo módulo (FI) se encarga de regular la variable intermedia,  $C_2(s)$ ; la entrada a esta unidad es el cambio en la variable intermedia,  $\Delta C_2(s)$ . Fig. 4 muestra la estructura interna del controlador difuso diseñado originalmente.

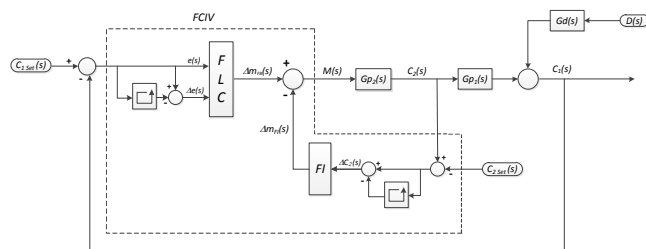


Fig. 4. Estructura interna del controlador FCIV.

La matriz de reglas difusas usada para el FLC se basa en la matriz diseñada por Macvicar-Whelan (Macvicar-Whelan 1976). Las variables lingüísticas involucradas son: negativo grande (NB), negativo medio (NM), negativo pequeño (NS), cero (Z), positivo pequeño (PS), positivo medio (PM) y positivo grande (PB). Tabla 1 muestra la distribución de reglas obtenidas para el FLC en función del error de la variable principal,  $e(n)$  y su cambio,  $\Delta e(n)$ .  $n$  es el tiempo en determinado momento acorde con el periodo de muestreo.

Tabla 1. Reglas para el módulo difuso FLC

$e(n) \setminus \Delta e(n)$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Las reglas para el módulo difuso FI fueron escogidas para corregir los cambios en la variable intermedia,  $\Delta C_2(n)$ ,

independiente de  $e(n)$  y  $\Delta e(n)$  (Tabla 2). Una explicación detallada del proceso se encuentra en la sección 4.1.

Tabla 2. Reglas para el módulo difuso FI

$\Delta C_2(n)$	$\Delta m_{INT}(n)$
NB	PB
NM	PM
NS	PS
Z	Z
PS	NS
PM	NM
PB	NB

Figuras 5 y 6 muestran las funciones de pertenencia para las entradas y salidas del controlador difuso FCIV.

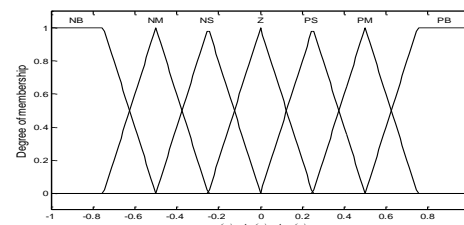


Fig. 5. Funciones de pertenencia para las entradas del FCIV.

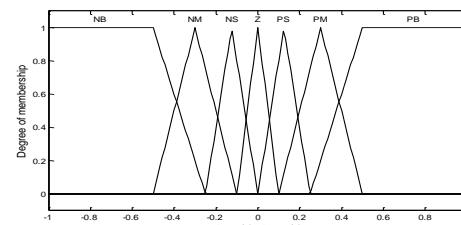


Fig. 6. Funciones de pertenencia para las salidas del FCIV.

#### 3.2 FCIV modificado

La figura 7 muestra esquemáticamente la modificación del FCIV propuesta en este trabajo para hacer frente a una perturbación. A diferencia de la estrategia de control por acción anticipada convencional la cual relaciona la perturbación con la señal a la válvula, aquí la acción anticipada se acopla entre el cambio de la perturbación y el cambio requerido en el set point de la variable intermedia, consiguiéndose así que el módulo difuso FI actúe sobre la variable intermedia de tal manera que corrija la perturbación con la misma efectividad que lo hace para el control en cascada; generando así el controlador por acción anticipada para el FCIV, el controlador con acción anticipada difusa, FFF (fuzzy feed forward), el cual complementa al FCIV original, para dar origen al controlador FCIV modificado (FCIV+FFF).

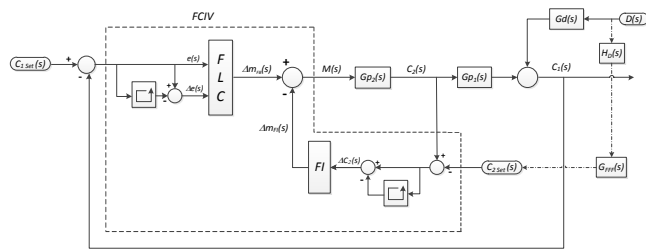


Fig. 7. Estructura global propuesta (FCIV modificado).

Para determinar la función de transferencia del controlador entre el cambio en una perturbación y el set point de la variable intermedia,  $G_{FF}(s)$  se procede a desconectar el módulo FLC. El modelo simplificado para este propósito se muestra en la figura 8.

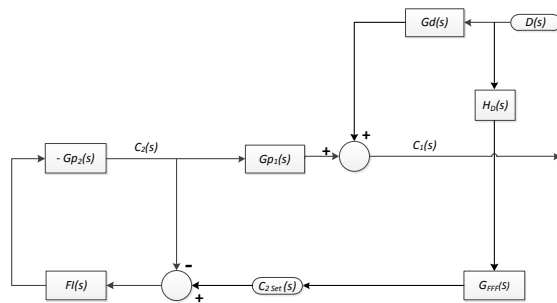


Fig. 8. Modelo propuesto simplificado para la determinación de  $G_{FF}$

Asumiendo que para cualquier cambio en la perturbación, la función de transferencia a diseñar,  $G_{FF}(s)$ , modificará el set point de la variable intermedia con el fin de corregir el efecto negativo de la perturbación y así mantener el valor de la variable principal en su valor deseado, se tiene entonces que bajo esta consideración  $C_1(s)$  es igual a cero, ya que la misma representa la variable de desviación de la variable principal. Aplicando esta teoría y haciendo uso del álgebra de bloques se consigue la función de transferencia  $G_{FF}(s)$ :

$$G_{FF}(s) = \frac{-G_d(s)}{H_D(s) \times \left[ \frac{-F_I(s) \times G_{p2}(s)}{1 - (F_I(s) \times G_{p2}(s))} \right] \times G_{p1}(s)} \quad (1)$$

donde:

$G_d(s)$  es la función que relaciona la perturbación con la variable principal,

$$G_d(s) = \left( \frac{K_D}{\tau_D s + 1} \right) e^{-\tau_{oD}s} \quad (2)$$

$G_{p1}(s)$  y  $G_{p2}(s)$  son las funciones que rigen el proceso,

$$G_{p1}(s) = \left( \frac{K_{p1}}{\tau_{p1}s + 1} \right) e^{-\tau_{op1}s} \quad (3)$$

$$G_{p2}(s) = \left( \frac{K_{p2}}{\tau_{p2}s + 1} \right) e^{-\tau_{op2}s} \quad (4)$$

$H_D(s)$  es la función de transferencia (sin dinámica) que describe el sensor/transmisor y que mide la perturbación, por lo tanto  $H_D(s) = K_{TD}$ .

$FI(s)$  es la función de transferencia del módulo difuso FI, cuyo valor es la constante  $K_{FI}$  (sin dinámica). Este valor es obtenido por una regresión lineal de la superficie difusa generada por el módulo FI. El valor obtenido es de 12% CO/%TO<sub>2</sub>.

Simplificando la ecuación (1) y sustituyendo las funciones de transferencia se obtiene:

$$G_{FF}(s) = \frac{-\left( \frac{K_D}{\tau_D s + 1} \right) e^{-\tau_{oD}s} + K_{FI} \times \left( \frac{K_{p2}}{\tau_{p2}s + 1} \times \frac{K_D}{\tau_D s + 1} \right) e^{-(\tau_{oD} + \tau_{op2})s}}{-K_{TD} \times K_{FI} \times \left( \frac{K_{p2}}{\tau_{p2}s + 1} \times \frac{K_{p1}}{\tau_{p1}s + 1} \right) e^{-(\tau_{op2} + \tau_{op1})s}} \quad (5)$$

Reduciendo la expresión anterior y agrupando términos, podemos obtener una ecuación aún más sencilla para  $G_{FF}(s)$ :

$$G_{FF}(s) = \left[ \frac{K_D}{K_{TD} \times K_{FI} \times K_{p2} \times K_{p1}} \right] \times \left[ e^{-(\tau_{oI} + \tau_{oII})s} (\tau_{p2}s + 1) - K_{FI} \times K_{p2} \times e^{-(\tau_{oII} + \tau_{oIII})s} \right] \times \left( \frac{\tau_{p1}s + 1}{(\tau_D s + 1)} \right) \quad (6)$$

donde:

$$\tau_{oI} = \tau_{oD} \quad (7)$$

$$\tau_{oII} = \tau_{oD} + \tau_{op1} \quad (8)$$

$$\tau_{oIII} = \tau_{op2} + \tau_{op1} \quad (9)$$

Sin embargo, debido a la presencia de un polinomio de mayor grado en el numerador en uno de los términos involucrados en la ecuación (6), es necesaria la inclusión de un filtro, por tanto la expresión final será:

$$G_{3F}(s) = \left[ \frac{K_D}{K_{TD} \times F_I \times K_{p2} \times K_{p1}} \right] \times \quad (10)$$

$$\left( \frac{\tau_{p1}s+1}{\tau_{D1}s+1} \right) \times \left[ e^{-(\tau_{oI}+\tau_{oII})s} \frac{(\tau_{p2}s+1)}{(\tau_{f}s+1)} - F_I \times K_{p2} \times e^{-(\tau_{oII}+\tau_{oIII})s} \right]$$

#### 4 Resultados

##### 4.1 El proceso

Para probar la efectividad de la propuesta, se ha seleccionado el reactor con pre-calentador de alimentación utilizado en la tesis doctoral de García (García 2006), la cual reposa en los archivos de la Universidad del Sur de la Florida (USF), y la misma puede conseguirse en el siguiente link: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/2529/>

El proceso consiste en un tanque de precalentamiento seguido por un reactor donde ocurre la siguiente reacción endotérmica  $A \rightarrow 2B + C$ . La fig. 9 muestra el esquema del proceso en estudio.

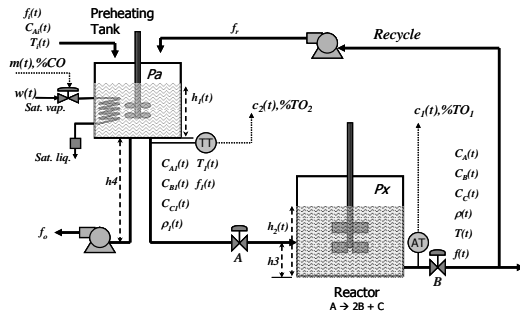


Fig. 9. Reactor con tanque de precalentamiento de alimentación.

La variable principal que se desea controlar es la concentración del componente C a la salida del reactor,  $C_C(t)$ . Dado que la reacción es endotérmica, la producción del componente C se ve favorecida por elevación de temperatura de reactivos, lo cual indica que un aumento del flujo de vapor al tanque de precalentamiento incidirá favorablemente sobre el rendimiento del producto deseado, mientras que una disminución de temperatura en la corriente de entrada al reactor desfavorece dicho rendimiento. Por tal razón, se ha escogido como variable intermedia a la temperatura a la salida del tanque de precalentamiento,  $T_1(t)$ , y como variable manipulada al flujo de vapor que se suministra al tanque de precalentamiento,  $w(t)$ . El balance de masa y energía en cada unidad de proceso, al igual que la cinética de la reacción, la ecuación de la válvula, las ecuaciones de los transmisores y una descripción matemática detallada del modelo que rige el proceso se encuentra en el apéndice 1 de la mencionada tesis doctoral.

##### 4.2 Desempeño de las estrategias de control

Los resultados reportados en el presente trabajo están realizados usando Matlab 8.2 (R2013b) y su respectiva

versión de Simulink. Las simulaciones se realizaron utilizando un periodo de muestreo de 0.25 min para todas ellas. La temperatura de entrada al tanque de precalentamiento ha sido considerada la principal perturbación. Seis estrategias control fueron implementadas: 1PID, 2PIs en cascada, PID +FF, 2PIs en cascada +FF, y los controladores difusos FCIV y FCIV+FFF. Los parámetros de sintonización de todos los controladores fueron optimizados usando rutinas Fminimax y Fmincon, contenidas el toolbox de optimización de Matlab. Las estructuras de los controladores PI y PID fueron diseñadas tomando en cuenta el "reajuste excesivo" (reset windup) recomendado para estrategias de control en cascada.

Para la obtención de los parámetros de cada función de transferencia, se hizo uso del método de ajuste 3 (fit.3.), procedimiento detallado en el libro de Smith & Corripio. Para obtener la función de transferencia que  $G_{p2}(s)$  se realizaron dos cambios de tipo escalón sobre la señal a la válvula,  $m(t)$ , de +/- 10%CO y se grabó la respuesta de la variable intermedia  $C_2(t)$ . Para determinar  $G_{p1}(s)$  se grabó la respuesta de la variable principal,  $C_1(t)$ . Finalmente se promediaron los valores los parámetros de cada proceso, obteniéndose las siguientes funciones de transferencia:

$$G_{p1}(s) = \left( \frac{1.9429}{11.0332s+1} \right) e^{-1.4919s} \tag{11}$$

$$G_{p2}(s) = \left( \frac{0.3152}{17.4152s+1} \right) e^{-0.4989*s} \tag{12}$$

Para determinar la función de transferencia  $G_d(s)$  se realizaron dos cambios en la perturbación más relevante,  $CA_i(t)$ , y se grabó la respuesta de la variable de salida  $C_1(t)$ . Un cambio de 10% por arriba y el otro de 10% por abajo su valor en estado estacionario permitieron determinar la siguiente función de transferencia:

$$G_d(s) = \left( \frac{37.31}{29.1458s+1} \right) e^{-7.9508s} \tag{13}$$

##### 4.2.1 Los controladores convencionales y el FCIV original

En los trabajos realizados por García (2006) sobre este proceso se compararon diferentes estrategias de control para enfrentar cambios de temperatura en la entrada al tanque de precalentamiento, mostrando el FCIV el mejor desempeño para enfrentar perturbaciones de esta naturaleza. Fig. 10 muestra el desempeño de diferentes controladores enfrentado un incremento de 10 oF (5.56 K) en la temperatura el flujo de alimentación a la entrada del tanque de precalentamiento. Se puede apreciar en la figura que el FCIV presenta menor desviación con respecto a la variable deseada, con tan solo un valor del integral absoluto del error (IAE) de 4.28; además muestra claramente la ausencia de

oscilaciones, lo que le da mayor estabilidad al sistema de control.

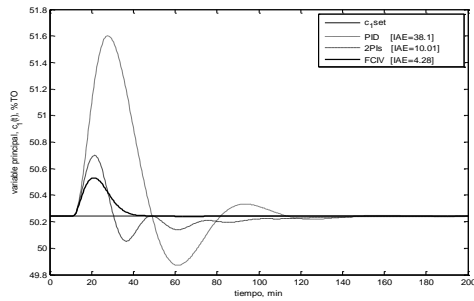


Fig. 10 Respuesta del proceso bajo diferentes sistemas de control

En la fig.11 se presenta el desempeño de las mismas estrategias de control enfrentando una perturbación de naturaleza diferente a la variable intermedia, la concentración del reactivo A en este caso, a la entrada del tanque de precalentamiento. Se puede observar en esta figura que las estrategias especialmente diseñadas para control en cascada (2PIs y FCIV) muestran un pobre desempeño en el control de la variable principal, cuando enfrentan un cambio de 20% en la concentración de  $CA_i(t)$ . El desempeño del PID es muy superior a cualquiera de las dos estrategias diseñadas para control en cascada para enfrentar dicha perturbación.

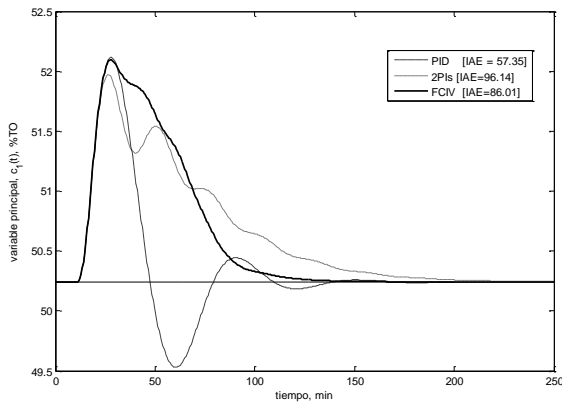


Fig. 11 Desempeño de los Controladores 1PID, 2PIs y FCIV ante un cambio de concentración en el flujo de entrada al precalentador

Agregando la estructura de control por acción anticipada, FF, a la estructura de control por retroalimentación (PID), se obtiene una notable mejoría en el nuevo sistema de control. Tal como se aprecia en la figura fig.12. Aplicando la ecuación (12-2.5) del libro de Smith & Corripio, el controlador FF obtenido para el proceso es:

$$FF(s) = \left( \frac{-37.31}{50 \cdot 0.672} \right) * \left( \frac{26.1151s+1}{29.1458s+1} \right) e^{(7.95-7.58)s} \quad (13)$$

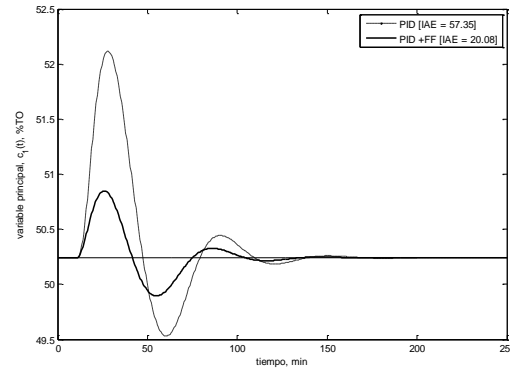


Fig. 12 Desempeño los controladores PID y PID+FF ante un cambio de concentración en el flujo de entrada al precalentador.

Sin embargo, aunque el controlador por acción anticipada FF, mejora considerablemente el desempeño del controlador PID, no ocurre lo mismo para el controlador FF que trabaja con estrategias diseñadas para control en cascada (ver fig.13). En esta figura se observa como el rendimiento de los 2PIs en cascada es prácticamente similar cuando se le agrega el control por acción anticipada, FF. Aunque los 2PIs+FF presenta una respuesta ligeramente menos agresiva y algo amortiguada, la desviación acumulada con respecto al valor deseado es prácticamente el misma.

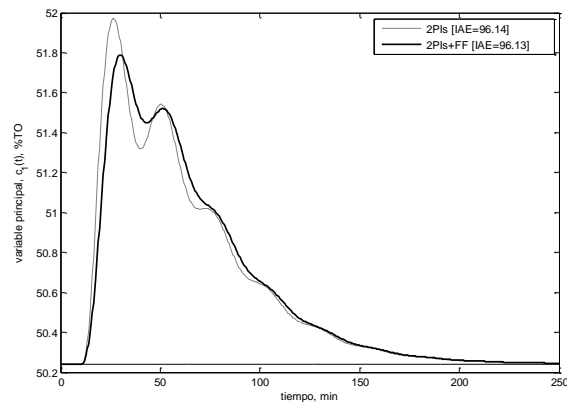


Fig. 13 Desempeño de los Controladores 2PIs y 2PIs +Feed Forward ante un cambio de concentración en el flujo de alimentación

#### 4.2.1 El FCIV modificado

El controlador propuesto en el presente trabajo, FCIV+FFF, presenta un excelente desempeño comparado con las otras estrategias de control avanzado, e incluso con el FCIV desarrollado anteriormente. La ecuación del controlador FFF desarrollado aquí, ecuación (10) tiene la siguiente función de transferencia para el proceso en estudio:



$$G_{3F}(s) = \left[ \frac{37.31}{50 \times 12 \times 0.3156 \times 1.9429} \right] \times \quad (14)$$

$$\left( \frac{(11.0332s+1)}{(29.1458s+1)} \right) \times \left[ e^{-(5.96)s} \frac{(17.4152s+1)}{(1s+1)} - 12 \times 0.3156 \times e^{-(6.46)s} \right]$$

Los valores de  $K_{TD}$ ,  $K_{F1}$  y  $\tau_f$  son 50,12 y 1 respectivamente.

En Fig.14 se puede apreciar como el FCIV con el controlador FFF desarrollado en este trabajo mejora significativamente el desempeño del controlador FCIV original. Se comparan los resultados contra el FCIV original y contra el FCIV con control por acción anticipada convencional FCIV+FF.

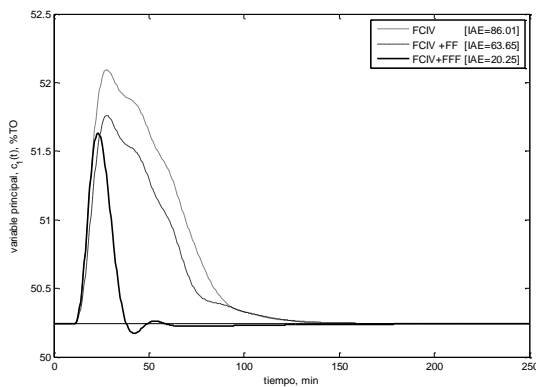


Fig. 14 Desempeño entre FCIV, FCIV más acción anticipada convencional y con acción anticipada difusa ante perturbación de concentración.

La fig.15 muestra las dos mejores estrategias de control que se reportan en este trabajo para enfrentar los cambios de concentración en la alimentación al tanque de precalentamiento, el PID+FF y el FCIV+FFF.

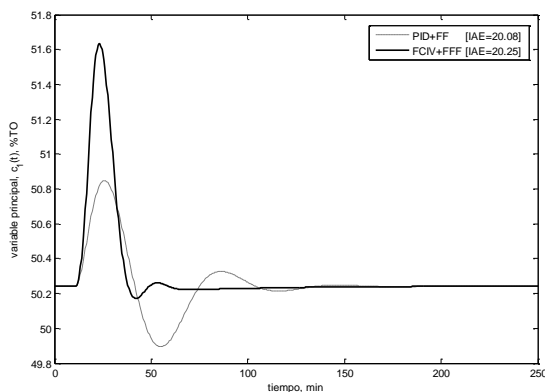


Fig. 15 Controladores PID con acción anticipada y FCIV+FFF ante una perturbación en la concentración de entrada al tanque de precalentamiento.

En la figura 15 se puede apreciar que la desviación acumulada del valor deseado es prácticamente el mismo con ambos controladores, sin embargo el controlador FCIV+FFF, presenta menos oscilaciones en la respuesta que

el PID+FF, lo que le da al controlador propuesto una ventaja con respecto a estabilidad en el sistema de control.

En la fig. 16 se puede apreciar como el controlador FCIV es más estable para diferentes perturbaciones presentes en el proceso, haciéndolo más robusto que el PID+FF. Las perturbaciones realizadas en el proceso son: a 200 min: descenso de 10 oF en  $T_i(t)$ , a 600 min: aumento de 5 oF en  $T_i(t)$ , a 800 min: aumento de 30 % en  $f_i(t)$ , a 1200 min: descenso de 5 oF en  $T_i(t)$ , a 1500 min: aumento de 5 10 oF en  $T_i(t)$  y a 1750min: aumento de 20% F en  $CA_i(t)$ .

Se puede apreciar en la fig. 16 que el controlador FCIV+FFF presenta mucho menos oscilaciones en la respuesta que el PID+FF, dándole una mayor robustez al sistema de control del proceso en estudio, tanto para cambios de temperatura en la alimentación como para cambios en la alimentación al tanque de precalentamiento,  $CA_i(t)$ , perturbación seleccionada para aplicar control por acción anticipada.

### 5 Conclusiones

Con el uso adecuado del algebra de bloques se ha llegado a determinar un controlador de acción anticipada para un controlador difuso, el controlador FFF.

El FCIV modificado, FCIV+FFF, controla el sistema ante una perturbación específica, con la misma efectividad que el FCIV original lo hace para sistemas de control en cascada, pero a diferencia del FCIV original, el nuevo controlador FCIV+FFF es muy eficiente para enfrentar una perturbación de naturaleza diferente a la variable intermedia, lo cual constituye el propósito de este trabajo de investigación. Por otro lado, el controlador FCIV+FFF, supera el desempeño proporcionado por la estrategia de control de acción anticipada convencional PID+FF, generando un sistema de control más estable y robusto que esta última estrategia.

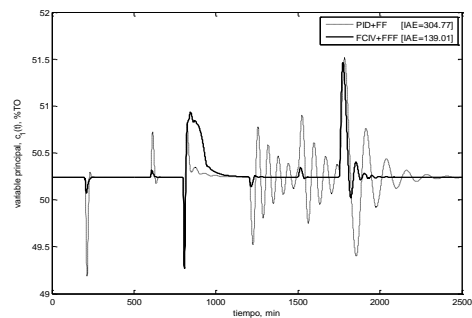


Fig. 16 Comportamiento de la variable principal con controladores PID+FF y con FCIV+FFF ante múltiples perturbaciones en el sistema.

### Referencias

Ding y col., 2014, A Cascade Fuzzy Control System for Inverted Pendulum based on Mamdani-Sugeno type, IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).

- Erdei Z, Borlan P, 2011, Fuzzy Logic Control, Carpathian Journal of Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 35- 40.
- García Y, 2006, Fuzzy Logic in Process Control: A New Fuzzy Logic Controller and an Improved Fuzzy-Internal Model Controller, Disertación Doctoral USF, Tampa USA.
- Iglesias E, 2002, Diseño de un Controlador Híbrido basado en Modo Deslizantes y Lógica Difusa, ULA. Mérida, Venezuela.
- MacVicar-Whelan P, 1976, Fuzzy sets for Man Machine Interaction, int. J. Man-Mach. Stud., No. 8 pp. 687-697.
- Maffezzoni C, Schiavoni N, Ferretti G, 1990, Robust Design of Cascade Control, IEEE Control Systems Magazine, Vol 10, No. 1, pp. 21-25.
- Maguiña RA, 2010, Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio, Revista de Investigación de Sistemas e Informática, Vol. 7, No. 1, pp. 91-104.
- Mamdani EH, Assilian S, 1975, An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp.1-13.
- Marchetti JL, Adam EJ, 2004, Designing and Tuning Robust Feedforward Controllers, Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, No.9, pp. 1899–1911.
- Oh Sk, Jang JH, Pedrycz W, 2011, Optimized fuzzy PD cascade controller: A comparative analysis and design, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 1, pp. 181-195.
- Sharma KD, Ayyub M, Saroha S, Faras A, 2014, Advanced Controllers Using Fuzzy Logic Controller (FLC) for Performance Improvement, International Electrical Engineering Journal (IEEJ), Vol. 5, No.6, pp. 1452-1458.
- Smith C, Corripio A, 2004, Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley & Sons, USA.
- Tran H, Lu X, 2003, A Fuzzy Logic Based Adaptive Feedforward PI Controller for Nanometer Positioning, ASPE.
- Tharanguini M, Ramesh B, Mani K, 2014, Fast Response Systems Using Feed Forward Loop for Fuzzy Tuned PID Controllers, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 14, No. 1, pp. 23-28.
- Stephanopoulos G, 1984, Chemical Process Control And Introduction to Theory and Practice, PTR Prentice Hall, New Jersey.
- Vilanova R, Katebi R, Wahab N, 2011, N-Removal on Wastewater Treatment Plants: A Process Control Approach, Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3, pp. 1-11.
- Zadeh LA, 1965, Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353.
- Azuaje, Ivana:** recibió el grado de Ingeniero Químico de la Universidad de los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 2017. Correo Electrónico: [azuajeivana@gmail.com](mailto:azuajeivana@gmail.com)
- Miranda, Moira:** recibió el grado de Ingeniero en Sistemas (ULA) en 1988, y en Ingeniería Química (ULA) en 1998. Recibe el grado de MSc. en Ingeniería de Control (ULA) en 2001 y en el 2005 el grado de Doctor en Ingeniería de Procesos de la Universidad de Pau (Francia, 2005). Actualmente trabaja como Profesor Asociado en la ULA. Su área de investigación es el modelado y control de procesos químicos. Correo Electrónico: [moira@ula.ve](mailto:moira@ula.ve).
- Iglesias, Edinzo:** recibió el grado de Ingeniero Químico (ULA) en 1993, y MSc. en Ingeniería Química (ULA) en 1998. En el 2006 recibe el grado de PhD en Ingeniería Química en la Universidad del Sur de la Florida (USF) Tampa, EE.UU. Se ha desempeñado en la docencia y la investigación en ULA (Venezuela), en la Universidad del Norte de Barranquilla, UN (Colombia) y en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, ESPOCH (Ecuador). Su área de investigación es el control inteligente de procesos químicos. Correo Electrónico: [iedinzo@ula.ve](mailto:iedinzo@ula.ve).
- Camacho, Oscar:** recibió el grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 1984. Recibió el MSc. en Ingeniería de Control (ULA), 1992. En 1994 obtuvo un ME en Ingeniería Química y en 1996 un Ph.D en Engineering Science ambos en la Universidad del Sur de la Florida (USF), Tampa, EE.UU. Desarrollo actividades de postdoctorado en USF en 2001. Se ha desempeñado en la docencia y la investigación en ULA y PDVSA (Venezuela), USF (EE. UU.) y EPN (Ecuador). Sus líneas de investigación actuales incluyen el control por modo deslizante, sistemas de control de procesos con elevado retardo, control de procesos químicos. Correo Electrónico: [ocamacho@ula.ve](mailto:ocamacho@ula.ve).
- García, Yohn:** recibió el grado de Ingeniero Químico (ULA) en 1993, y MSc. en Ingeniería Química (ULA) en 1998. En el 2006 recibe el grado de PhD en Ingeniería Química en la Universidad del Sur de la Florida (USF) Tampa, EE.UU. Se ha desempeñado en la docencia y la investigación en ULA, PEQUIVEN Y PDVSA (Venezuela), en la Universidad del Norte de Barranquilla, UN (Colombia). Su área de investigación es el control inteligente de procesos químicos.

**Recibido:** 26 de febrero de 2016

**Aceptado:** 08 de abril de 2017