

SISTEMA DE CONTROL PARA PROCESOS DE FERMENTACIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL CARBURANTE

Luini Leonardo Hurtado C.

Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería, Universidad Autónoma de Colombia. luini@madrid.com

Johanna María Rengifo J.

Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia. johanna.rengifo@unad.edu.co

Mauricio Andrés Manrique O.

Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia. mao241@gmail.com

Recibido: 01-05-2009, aceptado: 01-06-2009, versión final: 01-07-2009*

RESUMEN

En este artículo se presenta el sistema de control automático para un proceso de fermentación de caña de azúcar en la producción de alcohol carburante con Saccharomyces Cerevisae. Para el diseño del controlador se utilizó el modelo de Monod, propuesto por "Zoltan Kalman Nagy". El modelo tiene en cuenta el comportamiento oscilatorio del proceso de cultivo y fermentación continua de la Saccharomyces Cerevisae. Luego del análisis dinámico se proponen dos estructuras de control, un PID clásico y un sistema inteligente por lógica difusa. En la simulación de la aplicación se evidencia un adecuado desempeño para el proceso alrededor del punto de operación para la temperatura y la concentración de etanol.

Palabras claves: Fermentación, alcohol carburante, control PID, sistemas no lineales, Levadura Saccharomyces Cerevisae.

ABSTRACT

In this article an automation control system for the process of sugar cane fermentation appears in the alcohol production fuel with Saccharomyces Cerevisae. For desing of the controller the model of Monod, proposed by Zoltan Kalman Nagy. The model, considers the oscillating behavior of the process of cultivation and continuous fermentation of the Saccharomyces Cerevisae. After the dynamic analysis, two structures of control set out, a classic PID and an intelligent system by Fuzzy Logic. In the simulation a suitable performance for the process around the point of operation for the temperature and the concentration of ethanol is demonstrated.

Keywords: Fermentation, alcohol fuel, PID control, nonlinear systems, Saccharomyces Cerevisae Leavening.

* Este artículo es resultado de un trabajo de investigación dentro del grupo de Automática y Robótica.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de etanol utilizado actualmente en Colombia aún no es el más eficiente, ya que la etapa en la que más pérdidas y baja producción se presenta es en la fermentación. La baja eficiencia se debe a la técnica utilizada en el cultivo y control de las bacterias para la fermentación. Un sistema de control apropiado debe encargarse de mantener en los niveles adecuados, la temperatura, la adición de sustratos y el nivel de acidez en el tanque de fermentación, garantizando un ambiente ideal para el crecimiento de las bacterias encargadas de fermentar el jugo, aumentando la concentración y disminuyendo el tiempo de producción de etanol. Lo anterior plantea la necesidad de mejorar las estrategias de control del proceso de fermentación para hacerlo más eficiente.

Algunos trabajos al respecto han sido desarrollados. Uno reciente presentado por el grupo de automática de la Universidad Nacional, Gaunal (Echeverry y otros, 2004) se basa en un reactor quimiostato para la fermentación continua utilizando *Zymomonas mobilis*. Dicho reactor se caracteriza por presentar un problema de difícil solución para el control, ya que los microorganismos usados para esta fermentación exhiben un comportamiento cinético altamente no lineal y oscilatorio. Se plantearon algunas soluciones para el control de las variables biotecnológicas del proceso usando el algoritmo tradicional PID, haciendo un análisis dinámico de los resultados y planteando estructuras multilazo y multivariable usando desacopladores entre algunas variables para la optimización del proceso.

El objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema de control de la temperatura en un fermentador de levadura que está refrigerado por unos serpentines internos por los que circula agua. Se analizó el proceso de fermentación y se desarrollaron los balances de masa y energía que describen el sistema para encontrar como afectan diferentes perturbaciones, a saber, el flujo y la temperatura de la

melaza que sirve de alimentación, el flujo y la temperatura del aire de los sopladores que mantienen el proceso aeróbico y el calor generado por el mismo proceso de fermentación, que es proporcional a la cantidad de levadura producida.

La temperatura óptima de fermentación de la *Saccharomyces Cerevisiae* en régimen aeróbico es 32°C lo que asegura el mejor rendimiento y calidad. La energía térmica es transportada rápidamente al interior de las células y el control de la temperatura es por consiguiente un parámetro importante del proceso. El agua caliente que sale del proceso se envía a tres torres de enfriamiento donde se reduce la temperatura al agua para ser reciclada.

Evaluando los parámetros, se propone un controlador PID clásico que da respuestas apropiadas, pero no las mejores, entonces se plantea un control inteligente por lógica difusa para lograr un mejor tiempo de asentamiento y mitigar el comportamiento oscilatorio de sistema.

2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ALCOHOL CARBURANTE

El alcohol carburante es un compuesto inflamable que no tiene color y tiene el olor característico de los alcoholes. Se puede producir a partir de cultivos de maíz, yuca, papa, remolacha, sorgo y caña de azúcar, ya que contienen carbohidratos que se fermentan y se transforman en alcohol.

El primer paso para la obtención del alcohol carburante, es el proceso de fermentación, donde los azúcares contenidos en los jugos y las mieles de los cultivos se transforman en alcohol con la ayuda de las levaduras. Una vez el alcohol es fermentado, pasa por unas columnas de destilación, donde se separan sus compuestos, obteniéndose alcohol más puro y vinazas. La etapa final es la deshidratación, donde se retira el agua del alcohol y se obtiene alcohol anhidro (alcohol sin agua) o alcohol carburante (UPME, 2002).

3. FERMENTACIÓN

La fermentación puede tener diversos significados según el contexto donde se aplique. En la microbiología industrial se ha definido como cualquier proceso que brinde un producto mediante el cultivo de un microorganismo (Bastidas y Arellano, 2001).

El fermentador se carga inicialmente con el inóculo o levadura base y con una cantidad inicial de sustrato que será fermentado produciendo más levadura. Este sustrato compuesto por melaza de caña de azúcar es alimentado continuamente durante toda la etapa de fermentación, que en total tiene una duración de 100 horas. Como se desea conseguir una fermentación aerobia, se utilizan sopladores para introducir aire dentro del fermentador.

El objetivo de un sistema de control automático es mantener la mezcla del fermentador en 32°C y el p^H en 4.5, para lo cual deben tenerse en cuenta la carga térmica del aire de los sopladores, de la melaza que se alimenta continuamente y del calor generado por la fermentación, que se estima alcanza los 1884 kJ/kg (Arias y otros, 2004).

En la figura 1, se presenta una arquitectura de monitoreo del proceso de fermentación, donde se pueden apreciar las variables del proceso, que son la temperatura del reactor, la concentración del sustrato, la biomasa y el porcentaje de etanol y el sistema de adquisición de datos que permite tomar las muestras en tiempo continuo (Cha e Hitzmann, 2004).

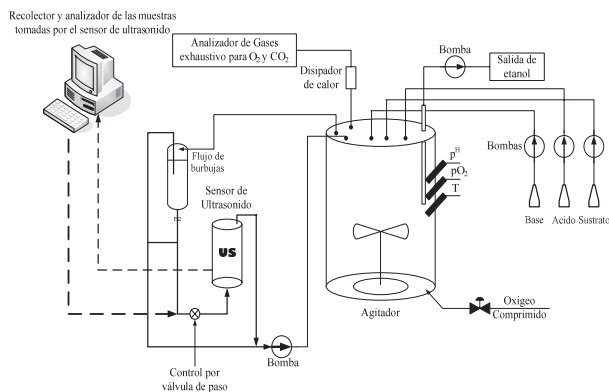


Figura 1. Diagrama del proceso de Fermentación

4. BALANCE DE MASAS: CINÉTICA DE LA REACCIÓN

La cinética de una reacción es una medida de la velocidad a la que esta se lleva a cabo y está dada por la razón de cambio de la concentración con respecto al tiempo. La cinética de una reacción de fermentación, se modela mediante la siguiente ecuación de Michaelis-Menten (Cha e Hitzmann, 2004).

$$rx = \frac{\mu_m S}{K_s + S} Cx \quad (1)$$

Donde Cx es la concentración de levadura y S es la concentración del sustrato limitante (melaza). Sin embargo, los nutrientes se alimentan constantemente y se considera que se encuentran en una concentración suficientemente grande para suponer que $S \gg K_s$, esto implica que la ecuación de la velocidad de reacción se simplifica a

$$rx = \mu_m Cx \quad (2)$$

La velocidad específica máxima de crecimiento μ_m para la levadura, depende de su temperatura y del p^H , a condiciones óptimas, a saber $T=30^\circ\text{C}$, y $p^H=4.5$ (Fogler, 1992).

Respecto a la dependencia de la velocidad específica de crecimiento con respecto a la temperatura, se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$\mu_m(T) = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) - A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (3)$$

El primer término a la derecha muestra un aumento general en la velocidad de reacción, mientras que el segundo término, que tiene una energía de activación más rápida que el primero, está asociado a una rápida reducción de crecimiento de las levaduras a medida que la temperatura aumenta sobre el óptimo.

El p^H de la levadura tiene un efecto menos pronunciado sobre la actividad biológica de la levadura y existe un rango de p^H suficientemente alto, el cual hace variar poco la velocidad de crecimiento. La relación matemática es la siguiente:

$$\mu_m(p^H) = \frac{\mu_m}{1 + \left(\frac{k_1}{[H^+]}\right) + k_2[H^+]} \quad (4)$$

Ésta ecuación, no se modela para el controlador porque se desconocen las constantes k_1 y k_2 y como ya se menciono, la variación es poca en un intervalo moderado de p^H , alrededor del punto optimo.

5. MODELO DE UN CULTIVO ALIMENTADO CON SACCHAROMYCES CEREVISAE

Para la elaboración de cualquier sistema de control del proceso de fermentación de caña de azúcar, lo primero que se requiere es elaborar un modelo matemático que simule el comportamiento natural del sistema a controlar. Para la elaboración del modelo de la levadura, se usaron datos experimentales tomados de un cultivo de levadura *Saccharomyces Cerevisae*, que consistió en una toma de muestras de biomasa y etanol y medidas on-line de sustrato.

Los Estados Funcionales (FS) correspondientes a las ratas de crecimiento celular, consumo de azúcar y producción de etanol en un proceso de crecimiento de la levadura para un lote alimentado se describen de acuerdo a un balance de masa son las siguientes:

$$\frac{dcX}{dt} = \mu cX - \frac{cS}{K_s + cS} e^{-k_{pc}P} - \frac{F_e}{V} cX \quad (5)$$

$$\frac{dcS}{dt} = -\frac{1}{R_{sx}} \mu cX - \frac{cS}{K_s + cS} e^{-k_{pc}P} - \frac{1}{R_{sp}} \mu cX - \frac{cS}{K_d + cS} e^{-k_{dc}P} + \frac{F_i}{V} cS_{in} - \frac{F_e}{V} cS \quad (6)$$

$$\frac{dcP}{dt} = \mu cP - \frac{cS}{K_{s1} + cS} e^{-k_{p1}cP} - \frac{F_e}{V} cP \quad (7)$$

$$\frac{dcO_2}{dt} = (kla)(c * O_2 - cO_2)rO_2 \quad (8)$$

Donde X , S y P son las concentraciones de biomasa, sustrato y etanol respectivamente (en g/l). Para los datos de los parámetros, se tomó como referencia la planta del Ingenio Risaralda. El primer término de las ecuaciones 5 y 6 representa respectivamente, la cantidad de biomasa y producto obtenido en la reacción de fermentación. El último término describe la cantidad

de levadura y etanol dejado en el reactor, y el primer y segundo término de la ecuación 7 representa la cantidad de sustrato consumido por la biomasa para el crecimiento de producción de etanol, el tercer término es la entrada de glucosa al reactor con un flujo de sustrato fresco y el ultimo termino es la cantidad de glucosa dejada en el reactor (Fogler, 1992).

La concentración de oxígeno disuelto en el medio de reacción resulta de la cantidad de oxígeno suministrado al medio de reacción, el primer término expresa la cantidad de transferencia de masa y el último termino la cantidad consumida en la reacción de fermentación. Los balances energéticos para la camisa de refrigeración y del reactor se presentan en las ecuaciones 9 y 10:

$$\frac{dTr}{dt} = \frac{F_i}{V}(T_{in}+273) - \frac{F_e}{V}(T_r+273) + \frac{rO_2\Delta Hr}{32\rho r_{Cheat,r}} + \frac{K_r A_r (Tr - Tag)}{V\rho r_{Cheat,r}} \quad (9)$$

$$\frac{dTag}{dt} = \frac{F_{ag}}{V_j}(T_{in,ag} - Tag) + \frac{K_r A_r (Tr - Tag)}{V_j \rho_{ag} r_{Cheat,ag}} \quad (10)$$

6. MODELAMIENTO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN

El modelamiento es realizado mediante bloques a través de la herramienta Simulink de Matlab® (Figura 3). El bloque principal "BIOREACTOR MODEL", se configuró con base al programa propuesto por "Zoltan Kalman Nagy" (Nagy, 2007), en este modelo se establecieron los parámetros del proceso como el equilibrio molar de las sales iónicas, los puntos óptimos de proceso entre otros; inmediatamente se plantea el modelo del proceso el cual será evaluado cíclicamente cada vez que se realice la simulación.

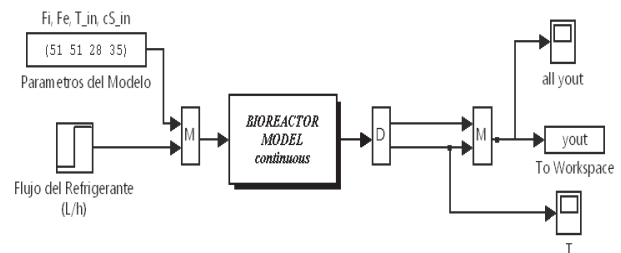


Figura 2. Diagrama de Bloques del Sistema en Lazo abierto

Los datos iniciales del sistema se muestran en la tabla No. 1.

Tabla 1
Datos iniciales del proceso de fermentación

$mNaCl$	500 g
$mCaCO_3$	100 g
$mMgCl_2$	100 g
pH	4,2
$Fi = Fe$	$51h^{-1}$
Tin	$28^{\circ}C$
cS_{in}	35 g/l
Tin_{ag}	$15^{\circ}C$

En las figuras 3 y 4 se puede observar la respuesta dinámica de las variables del sistema, con una consigna tipo escalón.

Analizando el comportamiento de las variables del proceso, se determinan los puntos críticos del sistema los cuales se tomaron como referencia para el diseño del controlador. En este caso el diseño se enfocó al control de la temperatura debido a que es una variable esencial para aumentar y estabilizar la producción de etanol.

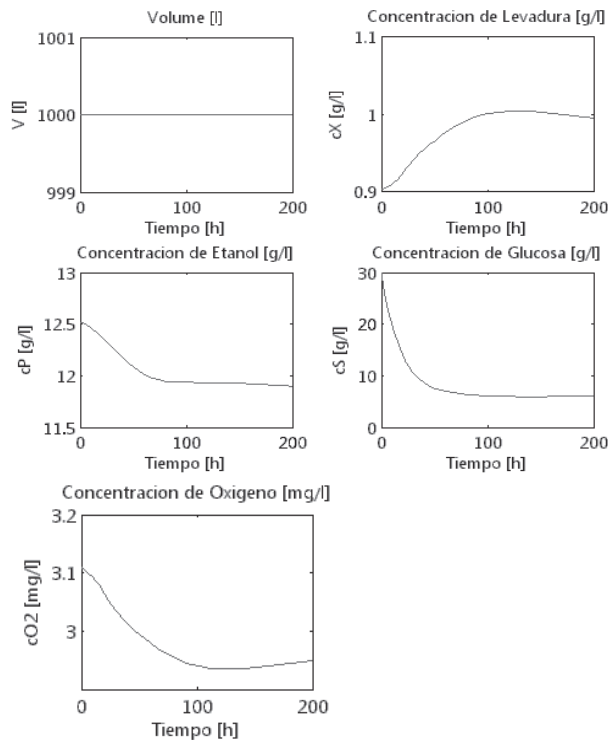


Figura 3. Respuesta dinámica de las variables del proceso frente al cambio del flujo de refrigerante.

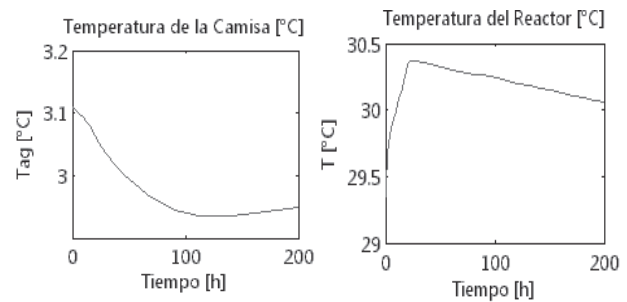


Figura 4. Respuesta dinámica de la temperatura de la camisa y del reactor frente al cambio del flujo de refrigerante.

Para el control del proceso de fermentación de caña de azúcar y de acuerdo con la experiencia de los ingenios, se establecieron los siguientes requisitos de diseño:

- Mantener las variables constantes a lo largo de un periodo determinado.
- Forzar las variables a seguir el camino prescrito un periodo determinado.
- Optimizar las funciones de las variables del sistema para obtener un tiempo de asentamiento de la señal menor a 40 horas, que la señal no presente oscilaciones y tener un aumento en la producción de etanol.

7. CONTROL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN

Inicialmente se diseñó un sistema de control clásico de temperatura del refrigerante en el biorreactor, se determinaron las ganancias K_p , T_i y T_d del controlador PID por el método de Ziegler-Nichols basado en la respuesta oscilatoria de la planta, ver tabla 2.

Tabla 2
Constantes del controlador PID

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	250	∞	0
PI	225	66.66	0
PID	500	40	10



En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques que se configuró para el proceso.

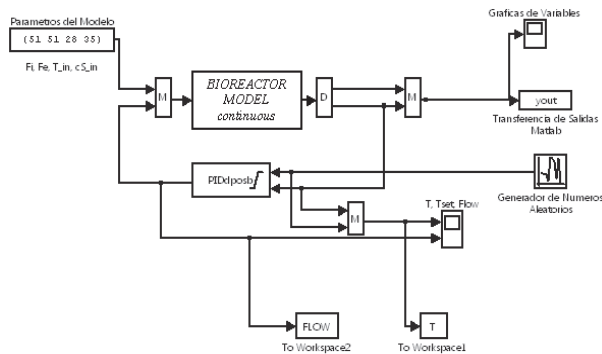


Figura 5. Diagrama de bloques de un controlador PID para la temperatura del reactor.

La temperatura del reactor ante los cambios del flujo de refrigerante se muestra en la figura 6.

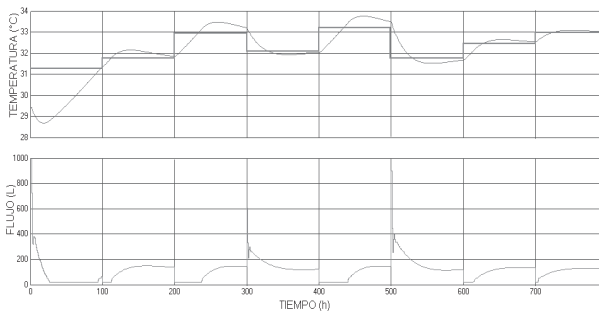


Figura 6. Temperatura del reactor frente a cambios en el flujo del refrigerante.

La estabilización del proceso es aceptable ya que el controlador presenta una rápida respuesta, estabilizando la temperatura entre 60 y 80 horas, aunque pareciera demasiado tiempo es una buena respuesta debido a que el proceso de fermentación es muy lento y los cambios que se presentan dentro del reactor son apreciables en horas.

En las figuras 7 y 8 se observa la respuesta dinámica de las demás variables que intervienen en el proceso de fermentación usando el controlador clásico PID, donde se comparó principalmente el aumento en la producción de etanol y su comportamiento dando como resultado un incremento de 0.8 g/L del producto cada 80 horas.

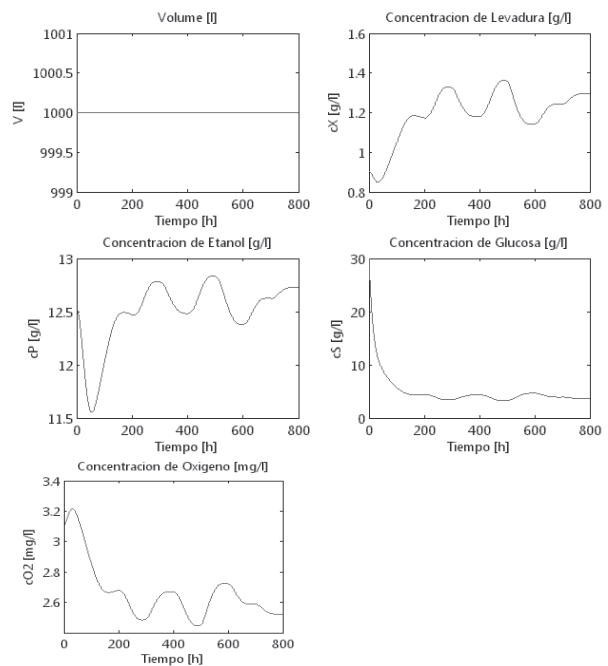


Figura 7. Respuesta de las variables del proceso frente al cambio del flujo de refrigerante con Controlador PID.

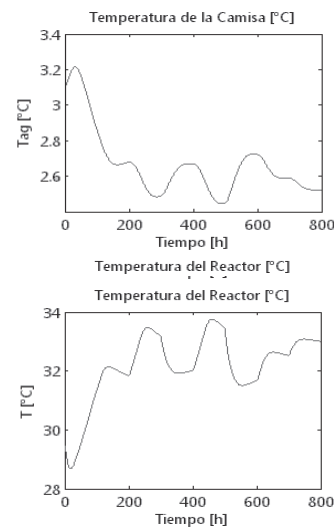


Figura 8. Respuesta dinámica de la temperatura de la camisa del reactor frente al cambio del flujo de refrigerante, usando un Controlador PID.

Con base al modelo usado para el diseño del controlador PID, se procedió a diseñar un controlador usando el método de Lógica Difusa, de acuerdo con en el diagrama de la figura 9, debido a que el controlador PID no cumplió con los objetivos de desempeño requeridos.

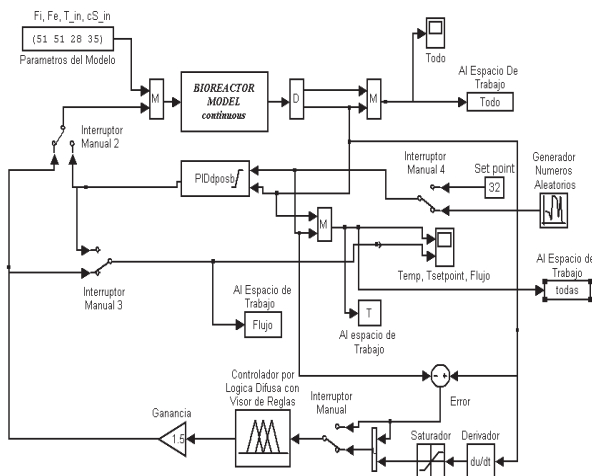


Figura 9. Diagrama de Bloques Controlador Difuso

Para este diseño, se utilizaron como variables de entrada a la máquina de inferencia la “Temperatura del Reactor” (temp) y la variación de temperatura del reactor (derivada), y la variable de salida como “Flujo de refrigerante” (posición de la válvula). El universo de discurso es el rango de temperaturas sobre las cuales opera el proceso (29°C a 33°C). Finalmente, se procedió a elaborar la base de reglas para el motor de inferencia para la operación de la válvula de flujo del refrigerante hacia el reactor

En la simulación obtenida del sistema (Figura 10) se puede observar que la señal se estabiliza aproximadamente en 15 h, cumpliendo con las expectativas del proceso.

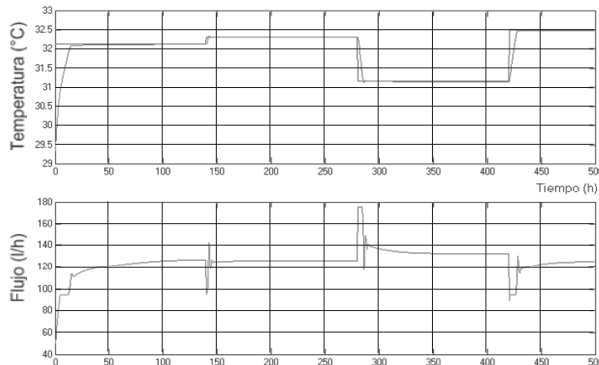


Figura 10. Salida del Sistema del Controlador Difuso

En las figuras 11 y 12 se observa el comportamiento de las demás variables que intervienen en el proceso, obtenidas por medio del con-

trolador difuso, que en comparación con el diseño del PID clásico presentan un comportamiento estacionario, aunque esto implique una disminución de 0.2 g/L en la producción de etanol.

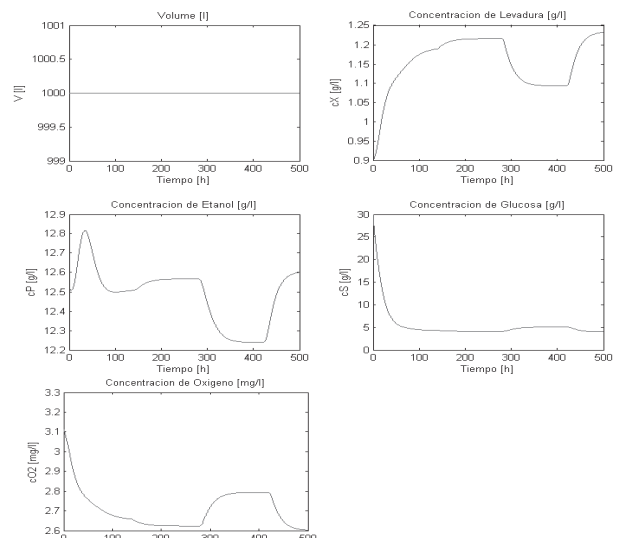


Figura 11. Respuesta dinámica de las variables del proceso frente al cambio del flujo de refrigerante con Controlador Difuso.

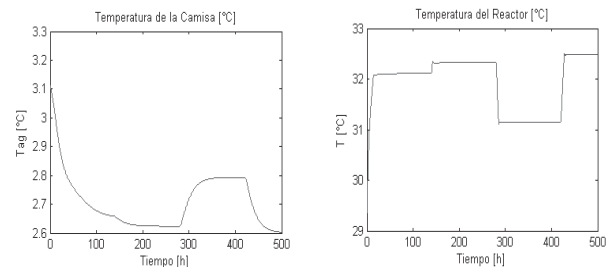


Figura 12. Respuesta dinámica de la temperatura de la camisa del reactor frente al cambio del flujo de refrigerante, usando un controlador difuso.

El controlador clásico PID diseñado para el regulador de flujo del refrigerante presenta un sobrepico menor al 20% y un tiempo de asentamiento de la señal se encuentra entre 60 y 80 horas.

Adicionalmente, se realizó una comparación con un diseño realizado por “Zoltan Kalman Nagy”, donde se registraron resultados similares (estabilización entre 50 y 70 horas), ver figura 13.



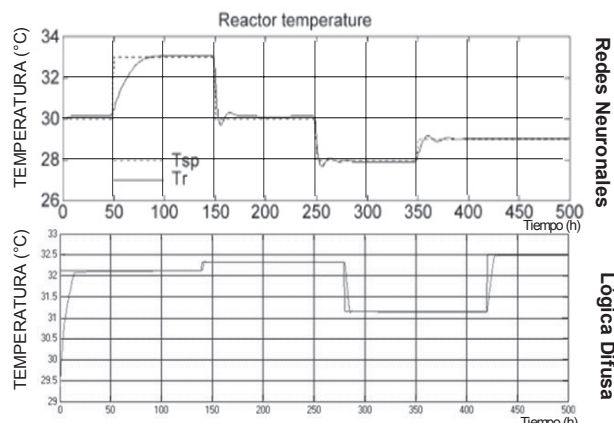


Figura 13. Control de la temperatura del reactor con sistemas inteligentes.

El lazo de control por Lógica Difusa permitió obtener del biorreactor las mejores condiciones para el proceso de fermentación, la estabilización de las oscilaciones, un tiempo de asentamiento menor y una mayor estabilidad en la producción de etanol, con respecto a los controladores PID y Red Neuronal.

CONCLUSIONES

Los controladores diseñados cumplen con los requisitos esperados en la región de operación definida para el sistema, permitieron encontrar relaciones entre las variables manipuladas del biorreactor y las salidas que se desean controlar.

De forma similar, se puede concluir que un lazo de control del flujo del refrigerante, representa un ahorro y un aprovechamiento en la materia prima, una mayor producción de etanol, pero dadas las condiciones cinéticas del microorganismo, las concentraciones de biomasa y etanol oscilan permanentemente, lo que no garantiza una máxima producción.

El lazo de control PID clásico proporciona una mayor cantidad en la producción de etanol y mantiene estable la concentración de alimento proporcionando un manejo parcial de los tópicos económicos del sistema.

El lazo de control por Lógica Difusa permitió obtener las mejores condiciones de operación del biorreactor para el proceso de fermentación y la estabilización de las oscilaciones del sistema.

Los controladores diseñados presentaron un buen comportamiento frente a perturbaciones constantes dentro reactor, con lo que se puede concluir que el sistema se acopla rápidamente a las nuevas condiciones de trabajo manteniéndose dentro de los rangos establecidos.

Al existir un rango de p^H suficientemente alto, éste tiene un efecto menos pronunciado en la velocidad de crecimiento de la levadura, por esta razón no se tuvo en cuenta en el diseño del sistema de control.

REFERENCIAS

- N. Echeverri, O. Quintero, M. Ramírez y H. Álvarez (2004). Control de un birreactor para fermentación alcohólica en continuo. *Memorias del XI Congreso Latinoamericano de Control Automático*. La Habana, Cuba.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2002). Programa de Alcohol Carburante en Colombia, Ministerio de Minas y Energía.
- Bastidas, E. y Arellano (2001). *Diseño preliminar de un proceso basado en fermentación extractiva para fabricación de etanol*. Escuela de Ingeniería Química. Universidad del Valle.

- Arias, J., Mora, A. y Rojas, H. (2004). *Control de Temperatura en un Fermentador para la Producción de Levadura*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática.
- Cha, Young-Lok, Hitzmann, Bernd (2004). Ultrasonic Measurements and its Evaluation for the Monitoring of *Saccharomyces Cerevisiae* Cultivation. Institute für Technische Chemie, Universitat Hannover. *Bioautomation*, vol 1, pp. 16-29.
- Fogler, H. (1992). *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2da Ed., Prentice Hall International, Inc., USA.
- Nagy, Z. (2007). Model Based Control of a Fermentation Bioreactor using Optimally Designed Artificial Neural Networks, *Chemical Engineering Journal*, 127, 95-109.

