

CONTROL DE PROCESOS EN OPERACIÓN LOTE EN REACTORES DE TANQUE AGITADO PARA FERMENTACION

Mendizábal Pereira María Fernanda, Hernández Escoto Héctor

1 Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala | Dirección de correo electrónico: mafermendi95@gmail.com

2 Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: hhee@ugto.mx

Resumen

Se abordó, en un marco de simulación por computadora, el problema de diseño y control de un proceso de fermentación anaeróbica para la producción de bioetanol en un bioreactor de tanque agitado en operación lote. El estudio se basó en determinar las condiciones iniciales de azúcar y levadura en las cuales se obtuviera mayor producto de etanol en un menor tiempo. También se diseñó un controlador con el cual se logra mantener una trayectoria de referencia que corresponde a las condiciones óptimas establecidas anteriormente en caso de que surjan perturbaciones en las cantidades cargadas al reactor.

Abstract

The problem of design and control of an anaerobic fermentation process to produce bioethanol in a stirred tank bioreactor batch operation was evaluated in a computer simulation framework. The study was based on establish the best initial conditions of fructose and yeast to produce the most quantity of product of ethanol in the shortest time. A controller was also designed with which it is possible to keep a reference trajectory corresponding to the optimum conditions established above in case of disturbances in the quantities charged to the reactor.

PALABRAS CLAVE

Control; Proceso de Fermentación; Bioetanol.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La fermentación alcohólica es un proceso biológico en plena ausencia de oxígeno, originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono, azúcares, para obtener como productos finales, un alcohol en forma de etanol, dióxido de carbono, en forma de gas y moléculas ATP. Un ciclo de fermentación completo suele incluir los siguientes procesos: esterilización en vacío de tanque y conductos utilizando vapor directo, inyección, carga del caldo base, esterilización indirecta, enfriado y vaciado de la camisa, preinoculación, inoculación, incubación, recogida y listo para el proceso de extracción. [1]

El etanol resultante se emplea en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas, tales como el vino, la cerveza, la sidra, tequila, etc. Actualmente se ha utiliza también etanol mediante la fermentación a nivel industrial a gran escala para ser empleado como biocombustible que se quema para obtener otro tipo de energía, ya sea motriz o eléctrica. El bioetanol se puede usar para el transporte o para la generación eléctrica, además de calorífica. [2]

La fermentación industrial es esencialmente un proceso que se produce en un recipiente llamado fermentador, un reactor de tipo batch donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con agitador que homogeniza la mezcla, mediante el cual determinados sustratos que componen el medio de cultivo (levaduras) son transformadas mediante la reacción microbiana en metabolitos y biomasa. Estos contenedores son herméticos y permiten retirar mediante canalizaciones apropiadas el dióxido de carbono resultante. [3]

El reto de este estudio es que, por medio de simulación, determinar la carga inicial de reactivos que se debe introducir al reactor para obtener la mayor cantidad de producto. Las cantidades iniciales determinar son la concentración inicial de azúcar (fructosa) el sustrato, y de levadura utilizando *Saccharomyces Cerevisiae* [4] y así encontrar el diseño óptimo para la fermentación, obteniendo la mayor cantidad de etanol en un menor tiempo.

Una vez encontradas estas condiciones es importante operar el reactor durante el tiempo establecido de tal manera que lote a lote siempre se obtenga la misma cantidad de producto. Para esto, utilizando un modelo matemático que describa este proceso de fermentación, se realizó el estudio de determinación de los factores que afectan el proceso y se diseñó un controlador avanzado para asegurar que se mantenga la trayectoria del proceso a las condiciones iniciales establecidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se considera para la simulación un biorreactor de tanque agitado en lote donde se lleva a cabo el proceso de fermentación utilizando fructosa y *Saccharomyces cerevisiae* como levadura para obtención de bioetanol con una temperatura constante.

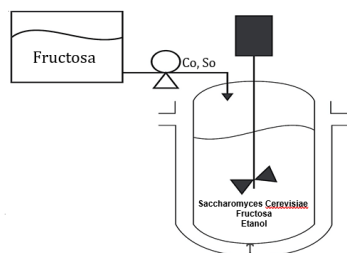


Figura 1. Reactor batch tanque agitado

El comportamiento del proceso de fermentación alcohólica llevado a cabo en el biorreactor está descrito por el siguiente modelo matemático:

$$\dot{V} = F_e, \quad V(0) = V_0 \quad (1)$$

$$\dot{C} = r_C(C, S, P) - D \cdot C \quad C(0) = C_0 \quad (2)$$

$$\dot{S} = -Y_{S/C} \cdot r_C(C, S, P) + D \cdot (S_e - S) \quad S(0) = S_0 \quad (3)$$

$$\dot{P} = +Y_{P/C} \cdot r_C(C, S, P) - D \cdot P \quad P(0) = P_0, \quad (4)$$

$$r_C(C, S, P) = \mu_{MAX} \frac{S}{k_S + S} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{MAX}}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{C}{C_{MAX}}\right)^m \cdot C \quad D = \frac{F_e}{V} \quad (5)$$

donde V , C , S y P son las variables de estado que representan, respectivamente, al volumen del reactor y las concentraciones de levadura, azúcar y producto (etanol). Las variables de entrada son el flujo de corriente de entrada, F_e , y la concentración de azúcar en la corriente de entrada, S_e ; D es conocida como la velocidad de dilución. r_C describe la velocidad de crecimiento de la levadura en la que μ_{MAX} es la velocidad máxima de crecimiento y k_S es la constante de afinidad del sustrato a la levadura. $Y_{S/C}$ y $Y_{P/C}$ son los coeficientes de consumo de azúcar por unidad másica de levadura formada, y el coeficiente de rendimiento de etanol formado por levadura formada, respectivamente. La velocidad de crecimiento toma en cuenta inhibición del proceso de fermentación por una alta concentración de etanol y de levadura, a través de los parámetros P_{MAX} , C_{MAX} , n y m .

Este modelo describe tanto una operación del reactor en lote (si S_e y $D = 0$), como en semi-lote (si S_e y $D > 0$).

Considerando uno de los propósitos de este trabajo, cabe hacer notar que V_0 , C_0 , S_0 y P_0 son los valores iniciales de las variables de estado; es decir, describe cómo estaría cargado el biorreactor en el arranque del proceso.

Determinación de condiciones iniciales

Se tenía como propósito la obtención de alta concentración de etanol en el menor tiempo posible logrando un consumo total de azúcar. Para esto se realizaron diversas simulaciones dinámicas con base a el modelo (ecuación 5). Las simulaciones consistieron en resolver numéricamente, en Matlab® con el resolvidor llamado "ode21s", las ecuaciones diferenciales del modelo con diferentes condiciones iniciales de azúcar y levadura, de esta manera simulando las diferentes cargas al reactor.

Las concentraciones iniciales exploradas fueron una combinación de los valores siguientes:

Tabla 1. Valores concentración inicial de azúcar (S_0) y levadura (C_0).

Co(g/L)	10	30	60	90	
So(g/L)	40	100	160	180	220

De cada simulación realizada a tiempo prolongado se obtuvo la concentración final de etanol (p.ej., Figura 2a). Posteriormente se determinó el tiempo de asentamiento con simulaciones realizadas a un tiempo pequeño, pero lo suficientemente largo para observar el punto en el que se alcanza un valor de alrededor del 98% del valor final de concentración encontrada (p.ej., Figura 2b).

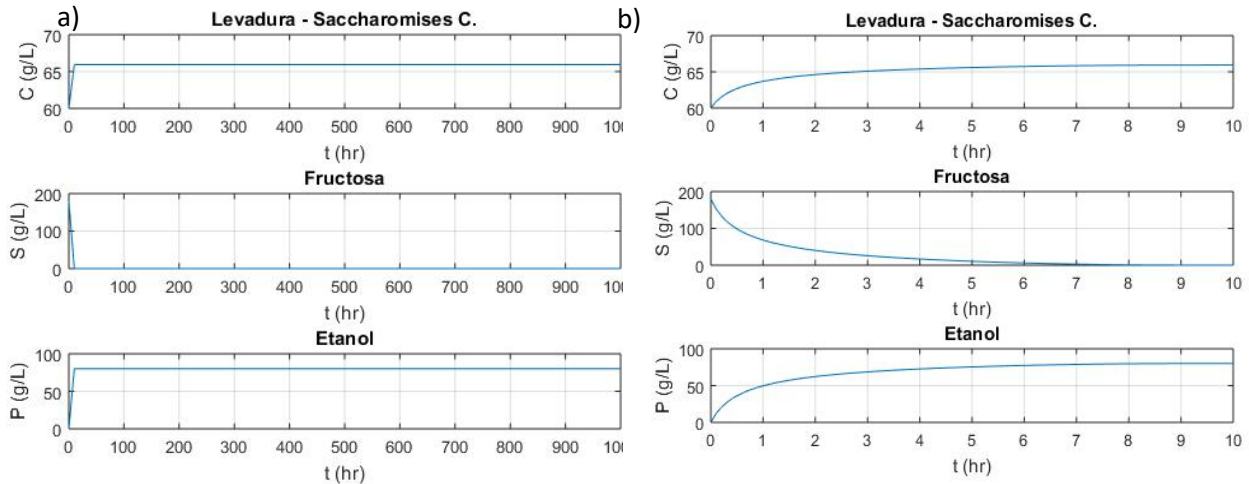


Figura 2. Respuesta dinámica de levadura, fructosa y etanol: a) tiempo infinito para determinación de valores finales y b) tiempo finito para determinación de tiempo de asentamiento.

De cada simulación se obtuvo una concentración final de etanol a determinado tiempo de asentamiento (P, t_s). Con estos valores se construyeron unas superficies de respuesta: P vs $\{C_o, S_o\}$ y de t_s vs $\{C_o, S_o\}$.

Diseño del Controlador

Una vez definida la carga del reactor, considerando que lote a lote pueden surgir diversos cambios en la operación del proceso, se construyó siguiendo una estrategia de control adaptivo [5] y se implementó el siguiente controlador:

$$F_e = \frac{V}{S_o - S} (u(t) + Y_{SC} \cdot r_C(C, S, P) - Y_{SC} \cdot r_C(\bar{C}, \bar{S}, \bar{P})) \quad (2)$$

$$u(t) = k_p \cdot (S(t) - \bar{S}(t)) + k_i \int_0^t (S(\tau) - \bar{S}(\tau)) d\tau$$

Donde las variables con una raya superior representan los valores que toma la variable en condiciones nominales; k_p y k_i son ganancias proporcional e integral del controlador cuyo valor se determina a través de una técnica de asignación de polos estables [5].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

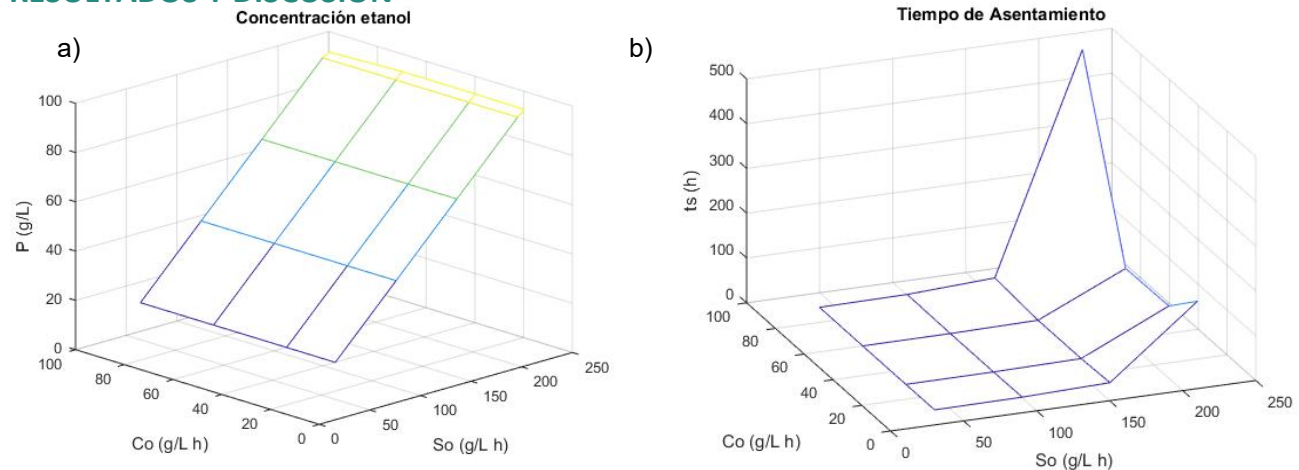


Figura 3. Superficie de respuesta a) P vs $\{C_o, S_o\}$ y b) t_s vs $\{C_o, S_o\}$.

TABLA NO 3. Condiciones iniciales cargadas al biorreactor tanque agitado.

Co=60(g/L)						
So(g/L)	C [∞] (g/L)	S [∞] (g/L)	P [∞] (g/L)	T(h)	P(g/L)	Ts(h)
160	65.28	2.18E-32	71.2	1000	69.776	3.4
165	65.445	1.67E-31	73.425	1000	71.9565	4
170	65.61	-2.29E-29	75.65	1000	74.137	4.75
175	65.775	7.88E-29	77.875	1000	76.3175	5.6
180	65.94	-7.77E-27	80.1	1000	78.498	6.75
220	17.26	5.91E-08	97.9	1000	95.942	162

En la Figura 3 se muestran las superficies de respuesta para el diseño del proceso. Se esperaba observar un punto crítico, en las cuales se mostrará las condiciones óptimas para el proceso en las superficies de respuesta. Entonces, para determinar la concentración máxima de etanol respecto a las concentraciones iniciales y en un tiempo de asentamiento aceptable, se optó por escoger la mejor condición de los valores dados en la Tabla 3, con los cuales se construyeron las superficies de respuesta.

Por razones de costo del proceso, se estableció como tiempo máximo 9 h y se concluyó que las mejores concentraciones a utilizar de azúcar y de levadura son So=180 g/L y Co=60 g/L, en un tiempo de asentamiento de 6.75 h. Se escogió este valor ya que al observar las tablas la concentración máxima de etanol como producto en un consumo casi total de fructosa.

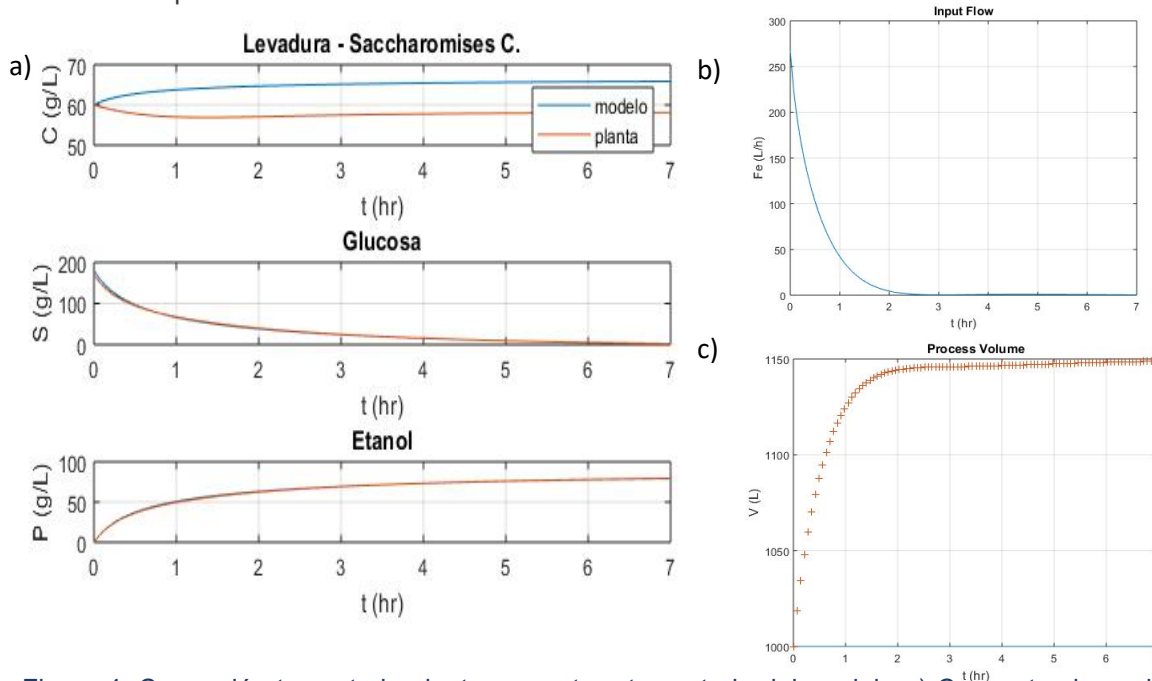


Figura 4. Corrección trayectoria planta respecto a trayectoria del modelo a) Concentraciones b) Volumen del proceso c) Flujo de entrada a condiciones de Co=60 g/L y So=170 g/L

En la Figura 4, se observa cómo funciona el controlador, si se le carga al reactor una menor cantidad de azúcar inicial. Según la figura 4 a) se consume la levadura, no existe remanente de azúcar y se llega a producir la misma cantidad de etanol que a las condiciones óptimas establecidas, depositando un flujo inicial de 300 L/h en la primera hora llegando a casi 0 L/h luego de las 2 h de haber iniciado el proceso, según se observa en la figura 4 c) lo cual produciría un aumento de volumen de 1000 L a 1150 L al finalizar el proceso.

CONCLUSIONES

En un proceso de lote tanque agitado, utilizando fructosa y levadura *Saccharomyces Cerevisae* las concentraciones iniciales que se le deben cargar al reactor es de 180 gramos de fructosa por litro y 60 gramos de levadura por litro aproximadamente para obtener la concentración máxima de etanol en un tiempo menor a 9h. Es posible obtener mayor cantidad de producto en el proceso aumentando la concentración inicial de cada condición, pero esto también aumentaría significativamente el tiempo de fermentación lo cual no es conveniente porque aumenta el costo del proceso. Si se realizara el proceso con mayores concentraciones iniciales de azúcar y levadura se podrían obtener mayores concentraciones de producto etanol en un tiempo muy grande, este estudio ilustra que a pesar del uso menores concentraciones en menores tiempos se puede obtener una concentración de etanol considerable. Por otra parte, se ilustra que, en el caso de existir una perturbación en el proceso, éste se puede corregir a través de un controlador que adiciona azúcar.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Héctor Hernández Escoto por involucrarme en su proyecto de investigación, compartirme su conocimiento y brindarme su apoyo para llevar a cabo el trabajo.

A la Universidad de Guanajuato por generar el interés por la Ciencia, generando el espacio para los estudiantes extranjeros y apoyándolos.

REFERENCIAS

- [1] "Fermentation Process Development of Industrial Organisms", Justin O. Neway, 1989; Marcel Dekker; ISBN 0-8247-7917-7
- [2] "Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas", H.J. Vázquez, INGENIERÍA Investigación y Tecnología VIII. 4. 249-259, 2007
- [3] Stanley M. Walas, Chemical Process Equipment, Selection and Design cap.17 ISBN 0-7506-9385-1
- [4] "A biochemically structured model for *Saccharomyces cerevisiae*", Frede Lei, Morten Rotbøll & Sten Bay Jørgensen; *Journal of Biotechnology*; Vol. 88, Issue 3, 12 July 2001, pp. 205-221