

Desarrollo de un controlador proporcional para la producción de microalgas

Gatica, Alejandra^a; Gil, Daiana^b; Scaglia, Gustavo^b; Rodriguez, Leandro^{b*}

^a Instituto de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Juan, Av. Lib. Gral San Martín (O) 1109, San Juan

^b Instituto de Ingeniería Química, CONICET - Univ. Nac. de San Juan, Av. Lib. Gral San Martín (O) 1109, San Juan

*Irodri@unsj.edu.ar

Resumen

Las microalgas son microorganismos unicelulares eucariotas fotosintéticos que se encuentran de manera natural en entornos acuáticos como océanos, lagos, estanques y ríos. Debido a su versatilidad y capacidad para producir diversos compuestos útiles, son un recurso invaluable con aplicaciones en industrias alimentarias, energéticas y en el tratamiento de efluentes. Sin embargo, su cultivo en fotobiorreactores puede ser afectado por fluctuaciones en nutrientes, dióxido de carbono y luz, lo que requiere un control preciso para maximizar la productividad.

En este estudio, proponemos diseñar un controlador proporcional para un fotobiorreactor destinado al cultivo de la microalga *Isochrysis aff. galbana* que produce lípidos neutros. Este sistema será modelado a través de un sistema de ecuaciones no lineales diferenciales. Dicho modelo incluye las concentraciones de biomasa de microalga, lípidos neutros, nitrógeno y sustrato. La variable a controlar es la concentración de biomasa, mientras que la variable manipulada es la tasa de dilución. La constante de proporcionalidad del controlador es ajustada utilizando un algoritmo genético. El sistema es simulado en un entorno de lazo cerrado, empleando la plataforma de programación y cálculo numérico Matlab.

Palabras clave: Control Proporcional, fotobiorreactor, lípidos neutros, microalgas.

INTRODUCCIÓN

Los fotobiorreactores son sistemas utilizados para cultivar organismos fotosintéticos como las microalgas bajo condiciones controladas de luz, temperatura, nutrientes y otros factores ambientales. El control de los fotobiorreactores es esencial para optimizar la producción de biomasa, mantener la calidad de los productos, prevenir contaminaciones y mejorar la eficiencia de recursos [1].

Las aplicaciones de microalgas también han evolucionado para la biorremediación y la captura de CO₂ [2]. En el primer caso, las microalgas pueden eliminar nutrientes de las aguas residuales, reduciendo el uso de productos químicos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. En el segundo caso, el CO₂ puro o los gases de combustión con alta concentración de CO₂ pueden ser dosificados en el cultivo de microalgas para reducir las fuerzas limitantes de transferencia de masa usando el aire atmosférico, que contiene pequeñas cantidades de CO₂.

El control de fotobiorreactores para la producción de microalgas enfrenta varios problemas, incluyendo la variabilidad de la luz, el mantenimiento de niveles

óptimos de nutrientes, y la regulación precisa de la temperatura y el pH. Además, la contaminación por organismos no deseados puede afectar la calidad del cultivo, y la acumulación de oxígeno producido durante la fotosíntesis puede ser tóxica. Los métodos de control efectivos a pequeña escala pueden no ser directamente aplicables a escalas industriales, lo que presenta desafíos adicionales en la escalabilidad y eficiencia del cultivo [3].

Este trabajo aborda el diseño de un controlador proporcional para un fotobiorreactor destinado a la producción de biomasa de microalga *Isochrysis aff. galbana*. La variable a controlar es la concentración de biomasa en el biorreactor, mientras que la variable manipulada es la tasa de dilución.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente forma. En la siguiente sección se presenta el modelo matemático del fotobiorreactor, se define el concepto de control proporcional y se formula el algoritmo genético para el ajuste de la constante de proporcionalidad del controlador. Luego, se analizan los resultados obtenidos al diseñar el controlador para

dicho sistema. Finalmente se presentan las conclusiones y trabajos futuros en la última sección.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es diseñar un controlador proporcional para un fotobiorreactor, tal que nos permita alcanzar una producción de biomasa de microalga *Isochrysis aff. galbana* establecida con un mínimo error de seguimiento y sin sobretiros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo del Proceso

En este trabajo se considera la producción de biomasa de microalga *Isochrysis aff. galbana* en un fotobiorreactor de quimiostato [4]. Dicho fotobiorreactor está hecho de un material transparente con lámparas externas que proporcionan luz para el crecimiento de microalgas. La corriente de entrada contiene la concentración del sustrato afluente (nitrato) (S_{in}). La corriente de salida está compuesta por el sustrato restante (S) y la biomasa de microalgas (X) que contiene cuotas de nitrógeno (N) y lípidos (L), denominadas q_N (N/X) y q_L (L/X), respectivamente. La tasa de dilución se da por la relación entre la tasa de flujo volumétrico (F) y el volumen del reactor (V). Se considera un modelo simple de cuatro estados [5]. Las principales suposiciones del modelo son: (i) Condiciones homogéneas. (ii) Condiciones constantes de volumen (5 L), temperatura (22 °C), luz (430 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y pH (8.2). (iii) Las microalgas están limitadas por una fuente inorgánica de nitrógeno, denotada S . (iv) La biomasa de microalgas, en términos de carbono orgánico, se agrupa en un solo estado, X . (v) El nutriente es absorbido por las microalgas para formar nitrógeno celular (N) a una tasa considerada como una función de Michaelis–Menten. (vi) El modelo de Droop describe la cinética del crecimiento de las microalgas, utilizando una cuota interna de nutrientes q_N (N/X) [5]. (vii) El carbono inorgánico se incorpora primero en el pool de azúcares g . Los lípidos neutros (principalmente triglicéridos) se utilizan para almacenar o proporcionar ácidos grasos cuando hay un desequilibrio entre la síntesis y la movilización de ácidos grasos. El modelo matemático se presenta en [6]:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_{in} - S) - \rho_m \frac{S}{K_S + S} X \quad (1)$$

$$\frac{dq_N}{dt} = \rho_m \frac{S}{K_S + S} - \mu_m \left(1 - \frac{q_0}{q_N}\right) q_N \quad (2)$$

$$\frac{dX}{dt} = DX + \mu_m \left(1 - \frac{q_0}{q_N}\right) X \quad (3)$$

$$\frac{dq_L}{dt} = (\beta q_N - q_N) \mu_m \left(1 - \frac{q_0}{q_N}\right) - \gamma \rho_m \frac{S}{K_S + S} \quad (4)$$

donde S ($\text{mg}[N] \text{ L}^{-1}$), X ($\text{mg}[C] \text{ L}^{-1}$), q_N ($\text{mg}[N] \text{ mg}[C]^{-1}$), q_L ($\text{mg}[L] \text{ mg}[C]^{-1}$), S_{in} ($\text{mg}[N] \text{ L}^{-1}$) es el sustrato de entrada. La tasa de dilución es $D = F/V$ (d^{-1}), ρ_m ($\text{mg}[N] \text{ mg}[C]^{-1} \text{ d}^{-1}$) es la máxima absorción para el consumo del sustrato, μ (d^{-1}) es el máximo crecimiento de la biomasa de microalgas. q_0 ($\text{mg}[N] \text{ mg}[C]^{-1}$) es la cuota mínima de nutrientes para el crecimiento de la biomasa y K_S ($\text{mg}[N] \text{ L}^{-1}$) es la constante de saturación para la absorción del sustrato.

Diseño del Controlador

Para fines de diseño de controlador proporcional, la variable controlada es X , mientras que D es la manipulada. Este tipo de control ajusta la salida en proporción al error presente, que es la diferencia entre el valor deseado de X (X^*) y el valor medido X . La constante proporcional (K_P) determina la magnitud de la corrección aplicada, mejorando la respuesta del sistema. Un valor de K_P demasiado alto puede llevar a inestabilidad y oscilaciones, mientras que un valor demasiado bajo puede resultar en una respuesta lenta e imprecisa.

$$D = K_P(X^* - X) \quad (5)$$

El controlador a lazo cerrado se muestra en la Figura 1.

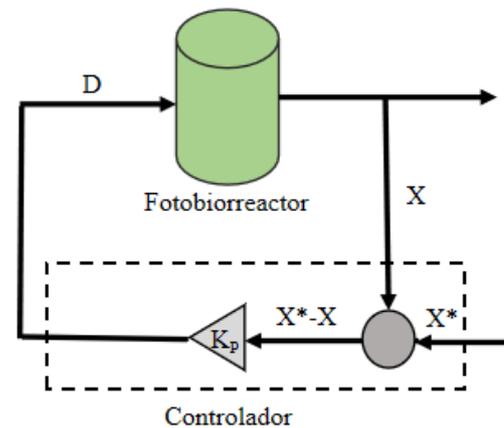


Figura 1. Controlador Proporcional

Ajuste del controlador

La constante de proporcionalidad del controlador es ajustada mediante algoritmos genéticos, los cuales funcionan imitando el proceso de selección natural.

Comienzan con una población inicial de posibles K_P y aplicando los operadores genéticos: selección, cruzamiento y mutación, se generan nuevos valores. A cada iteración, se simula el sistema a lazo cerrado y se evalúan los K_P según la función de aptitud: $\sum_{t=0}^{t_f} (X^* - X)$ siendo t_f el tiempo final de simulación del proceso, y las mejores se seleccionan para formar la próxima generación. Este proceso se repite hasta que se alcanzaron las 25 iteraciones.

RESULTADOS

Se simuló a lazo cerrado el fotobiorreactor de quimiostato en la plataforma de cálculo numérico Matlab. Los valores de los parámetros nominales son [5]: $S_{in} = 4.2 \text{ mg[N] L}^{-1}$, $K_S = 0.018 \text{ mg[N] L}^{-1}$, $q_0 = 0.05 \text{ mg[N] mg[C]}^{-1}$, $\mu_m = 1 \text{ d}^{-1}$, $\rho_m = 0.095 \text{ mg[N] mg[C]}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $\beta = 4.8 \text{ mg[C] mg[N]}^{-1}$, y $\gamma = 3 \text{ mg[C] mg[N]}^{-1}$. El estado inicial está dado por $[S, q_N, q_L, X]_0 = [0.009364 \text{ mg[N] L}^{-1}, 0.08246 \text{ mg[N] mg[X]}^{-1}, 51.14 \text{ mg[X] L}^{-1}, 0.0143 \text{ mg[L] mg[X]}^{-1}]$, y se obtiene con los valores de los parámetros mencionados y un D inicial de 0.4 d^{-1} . Se estableció $X^* = 56 \text{ mg[X] L}^{-1}$ como referencia. La K_P del controlador fue sintonizada utilizando algoritmos genéticos. Después de 25 iteraciones, el valor obtenido de K_P fue 8,125. Las trayectorias de las variables controlada y manipulada se muestran en las Figuras 2 y 3 respectivamente:

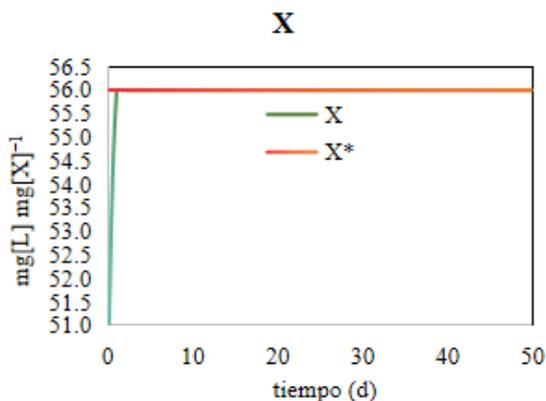


Figura 2. Trayectoria de X

Cómo se observa en la Figura 2, a pesar de ser un sistema de dinámica lenta, la referencia de la variable controlada X se alcanza en el día 1 y se mantiene hasta el final del periodo de simulación. Cabe destacar que el error de seguimiento, definido como la diferencia entre

X^* y X , se mantiene prácticamente constante en 0.011 después del día 1 y hasta el final de la simulación.

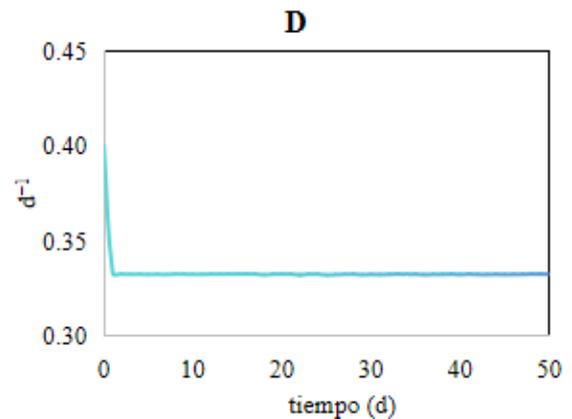


Figura 3. Trayectoria de D

Por otro lado, como se observa en la Figura 3, la tasa de dilución bajó del 0.4 d^{-1} inicial a 0.332 d^{-1} manteniéndose prácticamente constante hasta el final de la simulación. Como el volumen del reactor es constante, la alimentación F disminuye entre el día 0 y 1.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se abordó el diseño de un controlador proporcional de un fotobiorreactor de quimiostato para la producción de biomasa de microalga *Isochrysis aff. galbana*. La constante de proporcionalidad del controlador se ajustó utilizando algoritmos genéticos. El controlador fue capaz de llevar la concentración de biomasa algal desde su estado inicial al valor de referencia deseado en 1 día con un error de seguimiento acotado y sin sobretiros. Si bien el desempeño del controlador es satisfactorio, se está trabajando en el agregado de una acción Integral para disminuir el error de seguimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mailleret, L., J. L. Gouzé, and O. Bernard. (2005). Nonlinear Control for Algae Growth Models in the Chemostat. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 27 (5): 319–27.
- [2] Razzak, S. A., S. A. M. Ali, M. M. Hossain, and H. deLasa. (2017). Biological CO₂ Fixation with Production of Microalgae in Wastewater-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 379–90.

- [3] Garzón-Castro, C. L., E. Delgado-Aguilera, J. A. Cortés-Romero, E. Tello, and G. Mazzanti. (2018). Performance of an Active Disturbance Rejection Control on a Simulated Continuous Microalgae Photobioreactor. *Computers & Chemical Engineering* 117: 129–44.
- [4] Rodríguez-Jara, M., Ramírez-Castelan, C., Samano-Perfecto, Q., Ricardez-Sandoval, L. & Puebla, H. (2023). Robust control designs for microalgae cultivation in continuous photobioreactors. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 21(4), 521-535.
- [5] Bernard, O. (2011) Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production, *Journal of Process Control*, 21, 1378-1389
- [6] Mairet, F., O. Bernard, P. Masci, T. Lacour, and A. Sciandra. (2011). Modelling Neutral Lipid Production by the Microalga *Isochrysis Aff. Galbana* under Nitrogen Limitation. *Bioresource Technology* 102 (1), 142–9.