

CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

Carreño, J.J.¹; Guzmán, J.L.²; Moreno, J.C.²; Villamizar, R.¹

jose.carreno@correo.uis.edu.co, joguzman@ual.es, jcmoreno@ual.es, rovillam@uis.edu.co

¹Dep. de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Colombia

²Departamento de Informática, Universidad de Almería, España

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de la regulación del pH en fotobiorreactores usando el enfoque de control por rechazo activo de perturbaciones. Dicha formulación se basa en el diseño de observadores GPI para la estimación en línea de perturbaciones externas y dinámicas no modeladas empleando el concepto de planitud diferencial. Con el fin de validar el rendimiento del controlador propuesto, se utiliza un simulador de un fotobiorreactor tipo Raceway a escala. Los resultados de simulación demuestran que el algoritmo de control evaluado mejora significativamente la precisión de la regulación del pH, logrando con ello una influencia positiva en la producción de biomasa.

Palabras clave: Reactor Raceway; Planitud Diferencial; Rechazo Activo de Perturbaciones; Observadores GPI; Microalgas, Control Robusto.

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de microalgas se ha convertido en un proceso intensamente estudiado, ya que puede utilizarse en diferentes sistemas, como el tratamiento de aguas residuales, la mitigación de CO₂ o la producción de bioenergía [9] [5]. La razón principal de esto es la alta eficiencia fotosintética de las microalgas en comparación con las plantas terrestres. Además, el cultivo de microalgas puede ser manejado en condiciones muy adversas como los climas semiáridos, donde se puede cultivar en cualquier época del año. Otro factor importante que caracteriza el proceso de las microalgas es la elevada tasa de cultivo para la superficie utilizada en su crecimiento [11]. La biomasa resultante es viable en la producción de biocombustibles, compuestos farmacéuticos, alimentos para la salud, así como alimentos para animales o para peces.

Desde la década de los 50 los fotobiorreactores Raceway han sido intensamente desarrollados con el fin de proporcionar una solución a escala industrial para el cultivo de microalgas. Por su escalabilidad y viabilidad, actualmete se les con-

sidera la tecnología de producción más adecuada para el cultivo industrial de microalgas. La popularidad de los reactores de conducción proviene de su baja inversión inicial en comparación con otras tecnologías competidoras, como los fotobiorreactores tubulares, que requieren estructuras y equipos más complejos. Otras ventajas relevantes de este tipo de reactor son la simplicidad de operación y los bajos costos de mantenimiento [14]. Todas estas propiedades hacen posible que estos reactores produzcan biocombustibles a partir de biomasa de microalgas.

Por otra parte, el CO₂ tiene una influencia clave en la producción final de biomasa de microalgas, ya que el carbono corresponde aproximadamente a la mitad de dicha biomasa. Eso implica que la inyección de CO₂ tiene una repercusión directa sobre el valor del pH del cultivo de microalgas. Un buen diseño de control automático determinará tanto el instante de tiempo como la cantidad adecuada de CO₂ a inyectar para mantener el pH del cultivo de microalgas en un rango de valores óptimo [10].

En este trabajo se describe el diseño de un esquema de retroalimentación de la salida robusto, basado en un controlador y un observador (ambos lineales) para el control y rechazo activo de perturbaciones en un fotobiorreactor tipo Raceway. Este tipo de observadores, llamados observadores Proporcional Integral Generalizados (GPI, por sus siglas en inglés), permiten reconstruir los errores de posición, velocidad, la perturbación desconocida de entrada del proceso y un cierto número de sus derivadas en el tiempo.

El Control por Rechazo Activo de Perturbaciones (ADRC por las siglas en inglés de Active Disturbance Rejection Control) constituye una metodología madura en el control de sistemas inciertos tanto lineales como no lineales [13]. La idea principal consiste en la estimación precisa de la parte desconocida de la dinámica del sistema a controlar y suprimir su efecto mediante la complementación de la ley de control con un esfuerzo de cancelación [4].

Este artículo está organizado de la siguiente ma-

nera: En la sección 2 se describe el principio de funcionamiento del fotobiorreactor tipo Raceway y del modelo matemático que describe su dinámica. La sección 3 relaciona los conceptos de rechazo activo de perturbaciones en sistemas diferencialmente planos y el diseño de observadores GPI. Se presenta también el procedimiento de diseño de un controlador PI robusto de dos grados de libertad y de un observador de perturbaciones para la planta en cuestión. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos en la validación del controlador y un análisis de dichos resultados. Finalmente la Sección 5 está dedicada a las conclusiones obtenidas con base a la validación del controlador.

2 FOTOBIORREACTOR RACEWAY

Las microalgas son microorganismos unicelulares presentes en todos los medios acuosos, y en muchas otras zonas ampliamente distribuidas por la biósfera. Su importancia se debe a su alta eficiencia para convertir la energía solar en biomasa, en sus elevadas tasas de producción y en su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales [1]. Estos microorganismos son utilizados para la obtención de productos químicos, farmacéuticos, agroalimentarios, etc., pero aún más interesante es que su alto poder calorífico la convierte en un sustituto perfecto de los combustibles fósiles.

La elevada velocidad de crecimiento de las microalgas junto con el poco volumen que ocupan, en comparación con otros organismos fotosintéticos, hacen posible que en la actualidad el cultivo se realice en depósitos adaptados, denominados fotobiorreactores, en los que se procura que se den las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo [7].

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El reactor experimental está situado en la Estación Experimental Las Palmerillas propiedad de la Fundación CAJAMAR (Almería, España). El carril tiene una superficie total de 100 m^2 y está formado por dos canales de 50 m, cada uno de 1 m de ancho y conectados por curvas en forma de U (ver Figura 1). Este reactor opera a una profundidad constante de 0.2 m según lo recomendado por [9] para dar el mejor rendimiento hidráulico en términos generales de consumo de energía, proporcionando un volumen total de 20 m^3 [10].

La mezcla fue realizada por una rueda de paletas de 1.2 m de diámetro con 8 palas de contrachapado marino y accionada por un motor eléctrico (W12

35 kW, 1500 rpm, Ebarba, Barcelona, España) con reducción de engranajes (WEB Ibérica S.A., Barcelona, España). La velocidad de las paletas se controla con un convertidor de frecuencia (CFW 08 WEB Ibérica, S.A., Barcelona, España). Además, la carbonatación se realiza a través de un sumidero de 0,65 m de ancho y de 1 m de profundidad, que cubre toda la anchura del canal (1 m) y se encuentra a 1.8 m aguas abajo de la rueda de paletas. El gas de combustión se inyecta a través de tres difusores de membrana de placa en el fondo del sumidero (AFD 270, EcoTec, España). La canalización y el sumidero están hechos de fibra de vidrio blanca de 3 mm de espesor.

2.2 MODELO DINÁMICO

Para el diseño del controlador se utiliza un modelo lineal en el punto de operación. El pH del cultivo está influenciado principalmente por dos fenómenos: el suministro de CO_2 y absorción de este como función de la disponibilidad de luz. El CO_2 suministrado, a través de los gases de combustión, contribuye a la formación de ácido carbónico causando una disminución en el pH del cultivo. Además, las microalgas realizan fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo CO_2 y produciendo O_2 , provocando así un aumento gradual del pH . Por otro lado, el aumento de la radiación solar produce variaciones en la tasa de fotosíntesis ocasionando con ello el aumento de la tasa del pH .

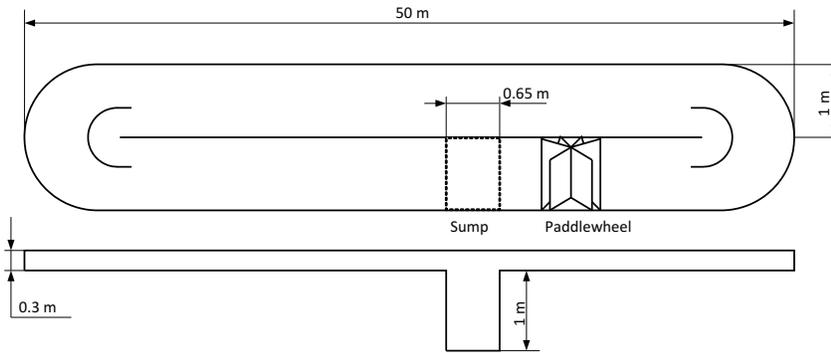
Considerando que la variable de control del proceso es el pH del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de los gases de combustión es la variable manipulada y la irradiación solar es la principal perturbación del sistema, el comportamiento del proceso puede representarse mediante modelos lineales simplificados.

El modelo lineal que relaciona el nivel de pH con la irradiancia y la entrada de inyección de CO_2 alrededor de un punto de operación está representado por la siguiente expresión [10]:

$$pH(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} u(s) + \frac{k_r}{\tau_r s + 1} e^{-\lambda_r s} I(s) \quad (1)$$

donde pH es el nivel de pH del cultivo, u es la cantidad de CO_2 inyectado o señal de control, e I es la irradiancia solar.

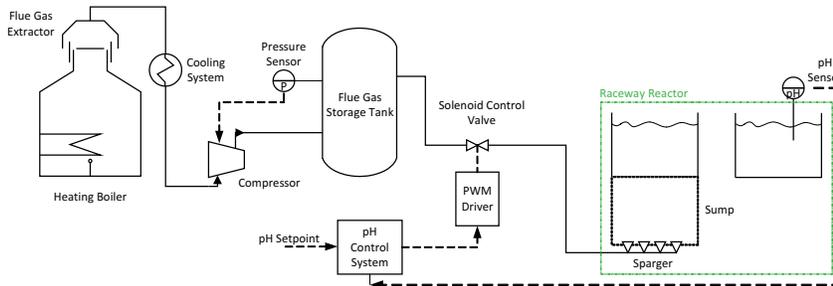
Debido a la representación de la dinámica de las entradas por medio de modelos de primer orden con retardo, se presentan errores de modelado. Sin embargo, esos errores no son un problema si se emplea una técnica de control robusta a perturbaciones externas e incertidumbre paramétrica en



(a) Vista superior y lateral del fotobiorreactor



(b) Instalaciones experimentales



(c) Sistema de control del pH

Figura 1: Fotoreactor Raceway

el modelo.

3 CONTROL DE SISTEMAS DIFERENCIALMENTE PLANOS

La planitud diferencial se deriva del enfoque diferencial algebraico y fue propuesta por Fliess y sus colaboradores (Levine, Martin, Rouchon) en 1995 [8]. Esta es una propiedad de algunos sistemas dinámicos controlados que permite trivializar la planificación de trayectorias sin resolver ecuaciones diferenciales mientras simplifica el problema del diseño del controlador de realimentación

a un conjunto de sistemas LTI desacoplados [12].

Considere el sistema dinámico n -dimensional, suave:

$$y^{(n)} = \phi(t, y)u + \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) \quad (2)$$

donde $\phi(t, y)$ es conocida, uniformemente acotada y alejada de cero, y la función $\psi(\cdot) = \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})$ puede ser desconocida y es uniformemente acotada de manera absoluta al igual que todas y cada una de sus derivadas temporales hasta un orden finito m .

Para el seguimiento de una trayectoria conocida suave $y^*(t)$, $t \in [0, \infty)$ por medio de una ley de con-

trol realimentado u , se propone el siguiente controlador linealizante basado en observador:

$$u = \frac{1}{\phi(t, y)} \left[[y^*(t)]^{(n)} - \sum_{i=0}^{n-1} k_i \left(y_i - [y^*(t)]^i \right) - \hat{\psi} \right] \quad (3)$$

donde $y_i, i = 0, 1, \dots, n-1$, $y, \hat{\psi} = z_1$ son las variables generadas por el siguiente observador de Luenberger extendido, conocido también como observador GPI (Generalized-Proportional-Integral):

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= y_1 + \lambda_{m+n-1}(y - y_0) \\ \dot{y}_j &= y_{j+1} + \lambda_{m+n-j-1}(y - y_0), \\ & \quad j = 1, \dots, n-2 \\ \dot{y}_{n-1} &= \phi(t, y)u + z_1 + \lambda_m(y - y_0) \\ \dot{z}_i &= z_{i+1} + \lambda_{m-1}(y - y_0), \quad i = 2, \dots, m-1 \\ \dot{z}_m &= \lambda_0(y - y_0) \end{aligned} \quad (4)$$

Los coeficientes k_j del controlador son seleccionados de tal forma que el siguiente polinomio en la variable compleja s , sea Hurwitz:

$$p_{cl}(s) = s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_1s + k_0 = 0 \quad (5)$$

De igual forma los coeficientes $\lambda_0, \dots, \lambda_{m+n-1}$ del observador se seleccionan de tal forma que el siguiente polinomio en la variable compleja s también sea Hurwitz:

$$p_{obs}(s) = s^n + \lambda_{n-1}s^{n-1} + \dots + \lambda_1s + \lambda_0 = 0 \quad (6)$$

3.1 CONTROL PI ROBUSTO DE DOS GRADOS DE LIBERAD

Considere el siguiente algoritmo de control de un PI de dos grados de libertad (2GDL):

$$u(s) = K_p \left[\beta r(s) - y(s) + \frac{r(s) - y(s)}{T_i s} \right] \quad (7)$$

Los parámetros del controlador a sintonizar son $\theta = \{K_p, T_i, \beta\}$.

Usando la ganancia del modelo del proceso, k , y la constante de tiempo, τ , así como la transformación $\hat{s} = \tau s$, la función de transferencia del pH con respecto a la variación del CO_2 de la ecuación 1 y la función de transferencia del PI de 2GDL de la ecuación 7 pueden ser expresados en una forma normalizada como sigue:

$$P(\hat{s}) = \frac{1}{\hat{s} + 1} e^{-\tau_L \hat{s}} \quad (8)$$

$$u(\hat{s}) = \hat{k}_p \left[\beta r(\hat{s}) - y(\hat{s}) + \frac{1}{\hat{\tau}_i \hat{s}} (r(\hat{s}) - y(\hat{s})) \right] \quad (9)$$

donde $\tau_L = \lambda/\tau$ es el retardo de tiempo del modelo normalizado y

$$K_p = \frac{\hat{k}_p}{k}, T_i = \hat{\tau}_i \tau \quad (10)$$

Una forma de expresar la robustez de un sistema es usando el margen de estabilidad S_m , que es la distancia más corta desde la curva de Nyquist hasta el punto crítico $(-1,0)$. Esta distancia es el recíproco del pico máximo de la función de sensibilidad, o Sensibilidad máxima, definida como sigue:

$$M_s = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + K(j\omega)P(j\omega)} \right| \quad (11)$$

donde $K(j\omega)$ y $P(j\omega)$ son las respuestas en frecuencia del controlador y de la planta, respectivamente.

Valores bajos de M_s implican sistemas de lazo cerrado con una función de transferencia que está lejos del punto crítico, y por lo tanto sistemas más robustos. En [3] se proponen las siguientes expresiones para calcular los parámetros de un PI robusto de dos grados de libertad para un sistema de primer orden:

$$\hat{k}_p = \frac{a_0 + a_1 \tau_L}{a_2 + a_3 \tau_L + a_4 \tau_L^2 + a_5 \tau_L^3} \quad (12)$$

$$\hat{\tau}_i = \frac{b_0 + b_1 \tau_L}{b_2 + b_3 \tau_L + b_4 \tau_L^2 + b_5 \tau_L^3 + b_6 \tau_L^4} \quad (13)$$

$$\beta = c_0 + c_1 \tau_L + c_2 \tau_L^2 + c_3 \tau_L^3 \quad (14)$$

Los coeficientes a_i, b_j y c_k se calculan en función del pico máximo de sensibilidad deseado solucionando un problema de optimización para minimizar un funcional de costo en términos del seguimiento y regulación deseados [2].

3.2 DISEÑO DE OBSERVADOR GPI PARA FOTOBIOREACTOR

Debido a que el retardo es muy pequeño comparado con la constante de tiempo del sistema, la dinámica del reactor Raceway descrita en la ecuación (1) puede ser aproximada a la siguiente ecuación de primer orden perturbada:

$$\dot{y} = \frac{k}{\tau} u(t) + \xi(t) \quad (15)$$

Para estimar la perturbación se propone el siguiente observador GPI:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}} &= \frac{k}{\tau} u(t) + z_1 + \lambda_3(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_1 &= z_2 + \lambda_2(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_2 &= z_3 + \lambda_1(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_3 &= \lambda_0(y - \hat{y}) \end{aligned} \quad (16)$$

donde $z_1 = \hat{\xi}(t)$, es la estimación de la perturbación externa, que hace referencia al efecto conjunto de la radiación y las dinámicas no modeladas.

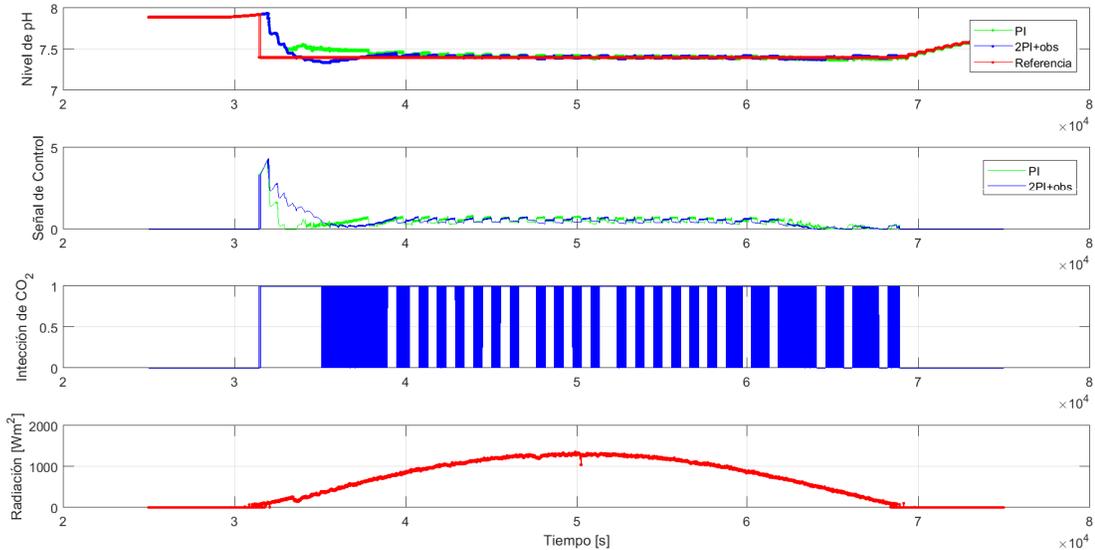


Figura 2: Validación del controlador para el día 23/10/2014

Con la selección de los coeficientes λ_i se logra obtener el siguiente polinomio característico del error de estimación:

$$p_{obs}(s) = s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 = 0 \quad (17)$$

Los parámetros $\lambda_0 \dots \lambda_3$ de la ecuación 17 se pueden calcular con base en la siguiente ecuación característica del error de estimación deseada:

$$p_{obs}(s) = (s^2 + 2\zeta_o \omega_{no} s + \omega_{no}^2)^2 = 0 \quad (18)$$

Con lo cual se pueden calcular los coeficientes del observador de la siguiente manera:

$$\lambda_3 = 4\zeta_o \omega_{no}, \quad \lambda_2 = 2\omega_{no}^2(1 + \zeta_o^2)$$

$$\lambda_1 = 4\zeta_o \omega_{no}^3, \quad \lambda_0 = \omega_{no}^4$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar el desempeño del esquema de control propuesto se empleó el simulador descrito en [6]. Los valores de irradiación empleados en la simulación corresponden a mediciones tomadas en la estación experimental Las Palmerillas durante un día soleado y un día nublado.

Los parámetros obtenidos alrededor del punto de operación del reactor de la ecuación 1 son: $k = 1.3554 \text{ pH}\%^{-1}$, $\tau = 58 \text{ min}$, $\lambda = 2.33 \text{ min}$, $k_r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ pHm}^2 \text{W}^{-1}$, $\tau_r = 91 \text{ min}$ y $\lambda_r = 1.5 \text{ min}$.

Con el fin de obtener un margen de fase superior a 41.85° y un margen de ganancia mínimo de 1.71dB (esto es una robustez de $M_s = 1.4$), las constantes

Tabla 1: Constantes de sintonización robusta

| j | a_j | b_j | c_j |
|-----|--------|---------|---------|
| 0 | 0.7253 | -0.1606 | 0.5049 |
| 1 | 0.6505 | 47.67 | 0.8330 |
| 2 | 0.0023 | 4.166 | -0.1034 |
| 3 | 2.143 | 30.23 | 0 |
| 4 | 1 | 7.973 | - - - |
| 5 | 0 | -4.738 | - - - |
| 6 | - - - | 1 | - - - |

de las ecuaciones 12, 13 y 14 deben seleccionarse como aparecen en la Tabla 1 [3].

Combinando las ecuaciones 10, 12, 13 y 14 se obtienen los parámetros del controlador robusto de dos grados de libertad:

$$K_p = -6.144; \quad T_i = 1133.36; \quad \beta = 0.5383$$

Además, para garantizar una rápida y buena estimación se puede emplear $\omega_{no} = 50$ y $\zeta_o = 2$ para el observador de perturbaciones.

El esquema de control propuesto, que combina el enfoque de rechazo activo de perturbaciones con el control PI robusto de dos grados de libertad se muestra en la Figura 4. La ley de control estaría definida por la siguiente ecuación:

$$u(s) = K_p \left[\beta r(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} e(s) \right] + \frac{\tau}{k} \hat{\xi}(t) \quad (19)$$

Las Figuras 2 y 3 muestran los resultados de simulación obtenidos para un día soleado y un día

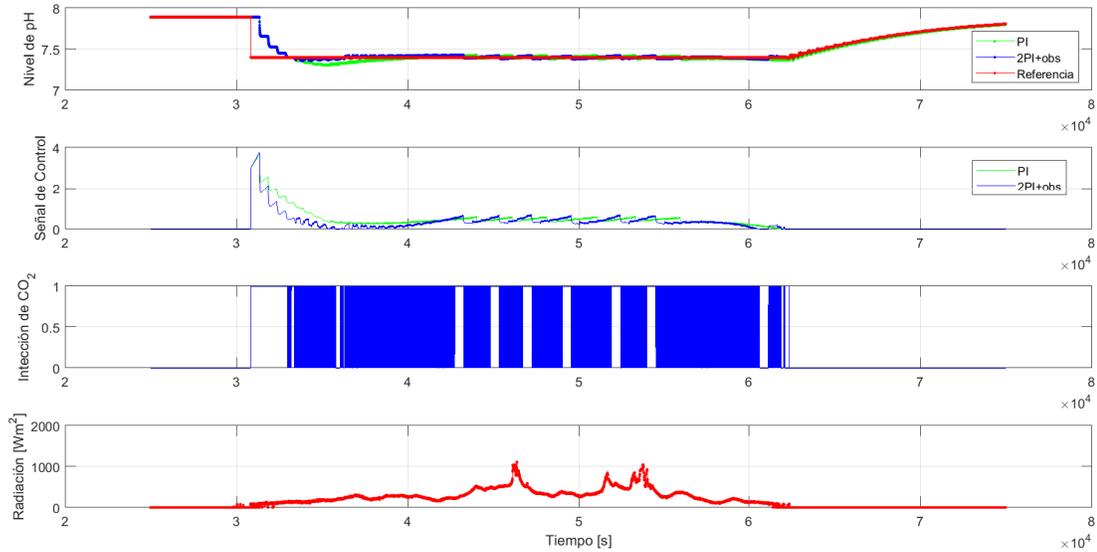


Figura 3: Validación del controlador para el día 21/11/2014

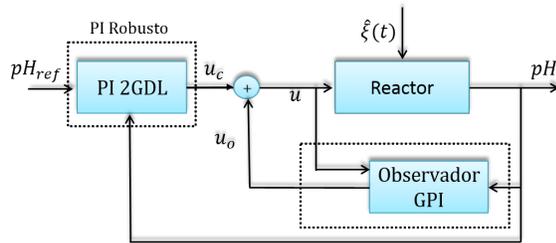


Figura 4: Esquema de control basado en observador GPI para fotobiorreactor

nublado, para el controlador PI con y sin observador de perturbaciones. En ambos casos el controlador con observador funciona ligeramente mejor que el PI sin observador y se puede verificar que en menos de 40 minutos y sin sopreimpulsos los niveles de pH siguen con exactitud el nivel de referencia fijado garantizando con ello un rechazo activo de las perturbaciones externas.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología para el diseño de controladores GPI en una planta de fotobiorreactores. En primer lugar, se utiliza un controlador PI de dos grados de libertad cuyo diseño se basa en la minimización de un funcional de coste y el valor máximo de sensibilidad permitido. Posteriormente, se utiliza el concepto de sistemas diferencialmente planos para diseñar un observador para el rechazo activo de perturbaciones.

Los resultados de simulación ratifican que el controlador propuesto estima en línea las perturbaciones externas medibles y no medibles y elimina activamente su efecto. El controlador es capaz de regular el pH tanto para días soleados como nublados y es robusto a pesar de las dinámicas no modeladas y las simplificaciones asumidas en el modelo de la planta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2014-55932-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER.

El autor Jose Carreño también agradece a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander (Colombia) y a la Asociación Universitaria Iberoamericana de Posgrados por financiar los gastos de estancia.

Referencias

- [1] ABALDE, J., CID, A., FIDALGO, P., TORRES, E., AND HERRERO, C. *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidade da Coruña, 1995.
- [2] ALFARO, V. M., AND VILANOVA, R. Model-reference robust tuning of 2dof pi controllers for first-and second-order plus dead-time controlled processes. *Journal of Process Control* 22, 2 (2012), 359–374.

- [3] ALFARO, V. M., AND VILANOVA, R. *Model-reference robust tuning of PID controllers*. Springer, 2016.
- [4] CORTÉS-ROMERO, J., JIMENEZ-TRIANA, A., CORAL-ENRIQUEZ, H., AND SIRARAMÍREZ, H. Algebraic estimation and active disturbance rejection in the control of flat systems. *Control Engineering Practice* 61 (2017), 173–182.
- [5] COSTACHE, T., FERNÁNDEZ, F. G. A., MORALES, M., FERNÁNDEZ-SEVILLA, J., STAMATIN, I., AND MOLINA, E. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied microbiology and biotechnology* 97, 17 (2013), 7627–7637.
- [6] FERNÁNDEZ, I., ACIÉN, F., GUZMÁN, J., BERENGUEL, M., AND MENDOZA, J. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research* 17 (2016), 67–78.
- [7] FERNÁNDEZ, M., BERENGUEL, M., AND GUZMÁN, J. Modelado y control de fotobiorreactores industriales. *Universidad de Almería* (2014).
- [8] FLIESS, M., LÉVINE, J., MARTIN, P., AND ROUCHON, P. Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples. *International journal of control* 61, 6 (1995), 1327–1361.
- [9] MENDOZA, J., GRANADOS, M., DE GODOS, I., ACIÉN, F., MOLINA, E., BANKS, C., AND HEAVEN, S. Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy* 54 (2013), 267–275.
- [10] PAWLOWSKI, A., MENDOZA, J., GUZMÁN, J., BERENGUEL, M., ACIÉN, F., AND DORMIDO, S. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture. *Bioresource technology* 170 (2014), 1–9.
- [11] PENG, L., LAN, C. Q., AND ZHANG, Z. Evolution, detrimental effects, and removal of oxygen in microalga cultures: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 32, 4 (2013), 982–988.
- [12] SIRARAMÍREZ, H., AND AGRAWAL, S. K. *Differentially flat systems*. CRC Press, 2004.
- [13] SIRARAMÍREZ, H., CORTÉS-ROMERO, J., AND LUVIANO-JUÁREZ, A. Robust linear control of nonlinear flat systems. In *Robust Control, Theory and Applications*. In-Tech, 2011.
- [14] WEISSMAN, J., AND GOEBEL, R. Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels. final report. *Solar Energy Research Institute, Golden CO, SERI/STR* (1987), 231–2840.