

CONTROL PREDICTIVE LINEAL DEL PH DE UN FOTOBIORREACTOR RACEWAY

Ángeles Hoyo, José Luis Guzmán, José Carlos Moreno, Manuel Berenguel
 Universidad de Almería - Campus de Excelencia Internacional Agroalimentaria CeiA3
 Centro de Investigación en Energía Solar CIESOL. Dep. de Informática, 04120 Almería, España.
 Tel: +34 950 214133 {angeles.hoyo,joseluis.guzman,jcmoreno,beren}@ual.es

Resumen

Este trabajo presenta la implementación de un controlador predictivo generalizado (GPC) para el control del pH en un fotobiorreactor raceway para el cultivo de microalgas. La variable más crítica en los procesos de crecimiento de microalgas es el pH, teniendo relación directa con la productividad del sistema. La dinámica no lineal del pH se ve afectada de manera directa e indirecta por más variables del sistema, como el aporte de CO₂ al medio de cultivo, el exceso de O₂ debido a la realización de la fotosíntesis por parte de las microalgas, la radiación solar y la concentración de biomasa. Este tipo de reactores están normalmente controlados mediante controladores clásicos todo/nada que no tienen en cuenta el modelo del sistema ni el consumo de CO₂. Debido a la importancia de mantener el pH dentro de unos valores determinados que afectan directamente a la productividad, en este trabajo se ha optado por diseñar un control predictivo lineal que permita acotar la salida del sistema a los valores óptimos que permitan aumentar su productividad, reduciendo el uso de CO₂ al mismo tiempo.

Palabras clave: control predictivo, GPC, fotobiorreactores, simulación.

1. Introducción

La importancia de la sostenibilidad medioambiental y la necesidad de hacer uso de energías renovables promueve el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, como es el caso del cultivo de microalgas en fotobiorreactores industriales. Estos procesos biológicos son muy conocidos en la actualidad debido al gran potencial de la biomasa obtenida para producir biodiesel o biomasa con fines energéticos, así como otros productos derivados tales como cosméticos, para la alimentación animal, o para el tratamiento de aguas residuales [1].

Hay principalmente dos tipos de reactores: los reactores tubulares o cerrados y los *raceway* o abiertos. Los más utilizados son los *raceway*, prin-

cipalmente por su bajo coste de inversión inicial, comparado con los tubulares, los cuales requieren estructuras y equipos más complejos. Los fotobiorreactores *raceway* han sido estudiados desde 1950 con el fin de aportar una solución para el cultivo de microalgas a escala industrial. Hoy en día, debido a su escalabilidad y su factibilidad, son considerados como la tecnología más adecuada para el cultivo a gran escala de microalgas. Otras ventajas relevantes de los reactores *raceway* son la simplicidad de operación y sus bajos costes de mantenimiento [2]. Numerosos estudios se han centrado en la selección óptima del diseño y configuración de los fotobiorreactores *raceway* para conseguir que las microalgas crezcan en las mejores condiciones. Actualmente existen numerosos diseños de fotobiorreactores que varían ligeramente del diseño original propuesto por Oswald y Golueke [3], quienes propusieron las condiciones óptimas de crecimiento [4].

Los sistemas biológicos tienen dinámicas muy complejas, siendo procesos difíciles de controlar y estando afectados por diferentes variables. En el crecimiento de las microalgas las variables más importantes que le afectan son la temperatura, la radiación solar, el pH y el oxígeno disuelto [5]. Para los reactores *raceway*, los requisitos de incidencia de la radiación solar y las condiciones de operación de temperatura vienen determinados generalmente por la propia arquitectura del sistema. Por tanto, las variables más importantes a controlar en este tipo de reactores son el pH y el oxígeno disuelto. Ambas variables tienen una dinámica altamente dependiente del proceso de fotosíntesis y es necesario mantenerlas cercanas a unos puntos de operación deseados [6]. Concretamente, el pH es la variable más importante a controlar ya que posee una influencia directa en el proceso de fotosíntesis, y por tanto en el crecimiento de las microalgas.

El control del pH en los reactores se ha tratado en la literatura desde distintos puntos de vista. Tradicionalmente, se ha realizado con controladores todo/nada. Este tipo de control hace un uso ineficiente de la inyección de CO₂, siendo necesario mejorar el desempeño del control con algoritmos que permitan mantener las variables más críticas

del sistema en sus valores óptimos mientras reducen el coste de su producción. En [7] se realizó un control lineal combinando un PI con un controlador por adelantado en torno al punto de operación deseado. En [8] se utilizó un controlador PID robusto basado en QFT en un reactor *raceway*. Para controlar el pH durante la noche, cuando no hay radiación solar, y conseguir una menor inyección de CO₂ durante el día, en [9] se propuso un control basado en eventos combinando dinámicas diurnas y nocturnas. Por otro lado, en [6] se realizó un control basado en eventos utilizando control predictivo basado en modelo, que posteriormente fue mejorado y combinado con un control selectivo y simultáneo del oxígeno disuelto [10].

Este trabajo presenta una nueva solución para el control de pH mediante el diseño de un algoritmo GPC lineal. Este método permite, introduciendo restricciones, acotar la salida del sistema a los valores deseados de pH, con el fin de aumentar la productividad y reducir el gasto de CO₂, limitando la señal y su incremento al mismo tiempo. Los resultados han sido evaluados satisfactoriamente en un simulador no lineal del proceso [11], analizando el comportamiento del sistema frente a diferentes exigencias de las restricciones sobre el pH del sistema.

El artículo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 del artículo se muestra una breve descripción del proceso real del cual se han obtenido los datos utilizados en este trabajo. El control predictivo generalizado se desarrolla en la sección 3. La sección 4 se dedica a la implementación del control en el simulador y el análisis de los resultados. Finalmente, la sección 5 está dedicada a conclusiones y futuros trabajos.

2. Descripción del proceso

El fotobiorreactor *raceway* utilizado en este trabajo se encuentra ubicado en la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar en Almería. Formado por dos canales de 50 m de largo y 1 m de ancho cada uno y unidos entre sí mediante una curva en forma de U, el área superficial total del reactor es de 100 m² (ver figura 1). Tal y como recomienda Mendoza [12], la profundidad de los canales es de 0.2 m para dar las mejores condiciones hidráulicas en términos de consumo de potencia, aportando un volumen total al reactor de 20 m³.

El flujo del reactor es impulsado mediante una rueda de pedales compuesta por 8 palas de 1.2 m de diámetro, controladas por un motor eléctrico. La inyección de CO₂ se produce a un 1 m de profundidad, en una fosa de 0.65 m de ancho, que abarca

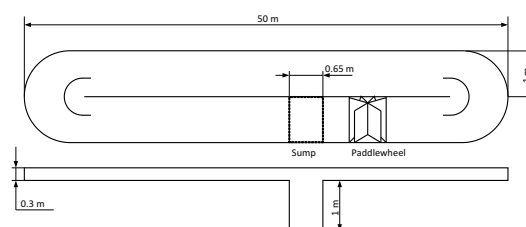


Figura 1: Esquema del fotobiorreactor



Figura 2: Fotobiorreactor

el ancho total del canal (1 m), y está situada a 1.8 m debajo de las palas (ver Figura 2).

Desde el punto de vista teórico, el control del pH es un problema no lineal que solo puede ser linealizado bajo ciertas circunstancias [11]. Considerando que la salida del proceso es el pH del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de CO₂ es la variable manipulable, y la radiación solar es la mayor perturbación del sistema. El comportamiento del sistema puede representarse con la siguiente ecuación diferencial [13], [14]:

$$\tau \frac{dpH}{dt} = \alpha u(t - t_r) + \beta(pH_0 - pH) + \gamma I \quad (1)$$

El pH_0 es el pH en el punto de equilibrio, β es un factor para ajustar la constante de tiempo del sistema, α es la ganancia estática del sistema, u es la señal de control, que representa las inyecciones de CO₂, t_r es el tiempo de retardo, y γ and τ son los parámetros que dependen de la radiación solar, I , y del estado del cultivo, respectivamente.

Este modelo lineal de bajo orden ha sido identificado teniendo en cuenta la estructura del fotobiorreactor, la localización del sensor del pH y las dinámicas observadas en los datos. De esta forma, el modelo anterior relacionando la salida del pH y la inyección de CO₂ puede ser representado con las siguientes funciones de transferencia [13]:

$$pH = \frac{k}{1 + \tau s} e^{-t_r s} u_{CO_2} + \frac{k_r}{1 + \tau_r s} I \quad (2)$$

donde pH es el pH del cultivo, u_{CO_2} es el porcen-

taje de apertura de la válvula, I es la radiación solar global, k y k_r son las ganancias estáticas, y τ y τ_r las constantes de tiempo correspondientes.

Los modelos utilizados en este trabajo han sido obtenidos en torno a valores de pH (punto de operación) donde, tal y como se muestra en la figura 3, la productividad del sistema es máxima [10]. De esta forma, se escogió como punto de operación $\text{pH}=7.8$.

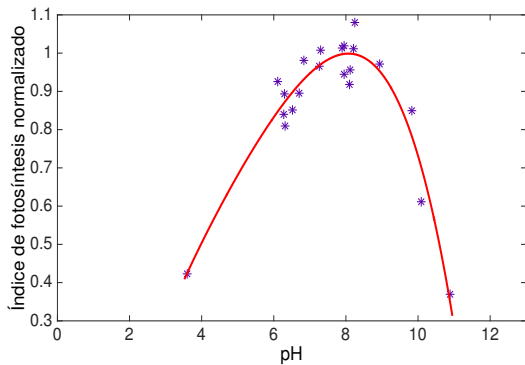


Figura 3: Relación pH y productividad

Para obtener el modelo, se han realizado diferentes trenes de pulsos en la inyección del CO_2 a lo largo del periodo diurno. El modelo obtenido se basa en la función de transferencia de primer orden del primer término de la ecuación (2). La figura 4 muestra como ejemplo la validación del modelo para un determinado día de ensayo [8]. Destacar que solo se ha hecho uso de la parte del modelo que depende de la inyección de CO_2 y se ha descartado el término de la radiación por tener un efecto muy pequeño sobre el pH (con valores de la ganancia k_r muy pequeños, del orden de 10^{-4}). Por otro lado, la componente oscilatoria de la dinámica se debe a la recirculación continua en el reactor. Dicha dinámica podría haber sido capturada con un término de segundo orden, tal y como se propuso en [13], pero en este trabajo se ha considerado como dinámica no modelada. El modelo resultante es (unidades en segundos):

$$\text{pH} = \frac{-1,65}{1 + 3390s} e^{-110s} u_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

3. Control predictivo

El Control Predictivo Generalizado (GPC) consiste en aplicar una secuencia de control [15], que minimice la función de coste de forma:

$$J = \sum_{N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (4)$$

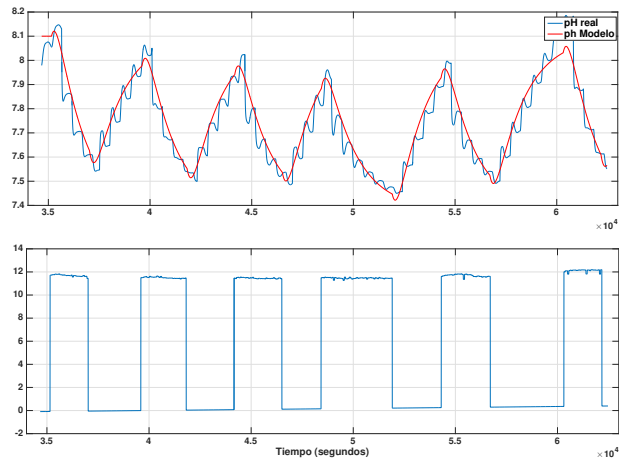


Figura 4: Validación del modelo. En rojo el modelo resultante.

donde $\hat{y}(t+j|t)$ es una predicción óptima j pasos adelante de la salida del sistema en el tiempo t , $\Delta u(t+j-1)$ son los incrementos futuros de la señal de control, N_1 y N_2 son los horizontes de predicción mínimo y máximo respectivamente, N_u es el horizonte de control, $\lambda(j)$ es la ponderación del esfuerzo de control y $w(t+j)$ es la trayectoria de la referencia futura.

El mínimo de J , asumiendo que no hay restricciones en la señal de control, se puede calcular haciendo el gradiente de J igual a 0, de forma que la solución óptima se puede obtener minimizando la función cuadrática expresada en forma vectorial:

$$J(u) = (Gu + f - w)^T (Gu + f - w) + \lambda u^T u \quad (5)$$

donde G contiene los coeficientes de la respuesta a escalón del proceso, f es la respuesta libre del sistema, w la trayectoria de la referencia futura y u los incrementos de la señal de control futuros. La ecuación (5) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T H u + b^T u + f_0 \quad (6)$$

donde $H = 2(G^T G + \lambda I)$, $b^T = 2(f - w)^T G$ y $f_0 = (f - w)^T (f - w)$. La función cuadrática obtenida se minimiza sujeta a las restricciones del sistema solucionando un problema de programación cuadrática clásico. Las restricciones implementadas en el controlador han sido las de amplitud e incremento de la señal de control, y la amplitud en la salida del sistema:

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u(t) \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u(t) \leq \Delta u_{\max} \\ y_{\min} &\leq y(t) \leq y_{\max} \end{aligned}$$

4. Resultados

En esta sección se presentan dos ensayos en simulación para un día con condiciones de radiación cambiantes debido al paso de nubes, con el fin de evaluar la estrategia de control que se plantea.

Los dos ensayos se han realizado para las mismas condiciones externas de radiación, pero variando la restricción en la salida, e imponiendo las limitaciones oportunas en la señal de control y en sus incrementos. El punto de operación del pH a la salida, y_{ref} , se ha fijado en 7.8. Cabe destacar que el objetivo fundamental del trabajo consiste en evaluar la posibilidad de conseguir limitar las variaciones del pH gracias a la capacidad de gestión de restricciones por parte del algoritmo GPC. Es por ello que los ensayos planteados se han centrado en el mismo día de simulación, pero considerando dos bandas diferentes permitidas en la salida, con el fin de analizar la consecución de dicho objetivo. Se han establecido los horizontes mínimo y máximo de predicción con los valores $N_1 = 1$ y $N_2 = 500$. El horizonte de control es $N_u = 3$ y la ponderación del esfuerzo de control toma el valor de $\lambda = 200$ [16]. El tiempo de muestreo fue establecido a 5 segundos.

Las restricciones se fijan con los siguientes valores:

$$0 \leq u(t) \leq CO_{2max}$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(t) \leq \Delta u_{max}$$

$$y_{min} = y_{ref} - Y_{min} \leq y(t) \leq y_{max} = y_{ref} + Y_{max}$$

La variable de control se limita a los valores que es capaz de dar el sistema real, entre 0 y el valor máximo de $CO_{2max} = 12$ L/min. El incremento de la señal de control fue igualmente establecido a una valor de 12 L/min. Por último, la salida del sistema se acota en valores muy próximos al valor de referencia de $y_{ref} = 7,8$, ya que como se comentó en la sección 2, mateniendo el valor del pH próximo a dicha referencia se conseguirá aumentar la productividad. En este caso, es posible limitar los valores máximos y mínimos sobre la referencia, y_{ref} , imponiendo valores a Y_{min} e Y_{max} respectivamente.

En la simulación, el algoritmo de control se activa una vez que la radiación supera los $100 \mu E/m^2s$.

La figura 5 muestra el primer ensayo donde los límites de la salida se impusieron con $Y_{min} = 0,2$ e $Y_{max} = 0,2$. Se puede observar que el algoritmo GPC consigue mantener la salida dentro de las bandas establecidas. Destacar que en algunas ocasiones sobrepasa dichos límites, siendo esto debido a los errores de modelado existentes en ese

punto de operación entre el modelo lineal obtenido y el modelo no lineal utilizado como simulador [11]. El uso de CO_2 se minimiza al tener que realizar únicamente pulsos para conseguir mantener la referencia entre los valores deseados y cumpliendo también las restricciones de la señal de control.

El segundo ensayo se muestra en la figura 6. En este caso, la referencia es la misma que en el ensayo anterior, pero se han reducido las bandas de la señal de salida a $Y_{min} = 0,1$ e $Y_{max} = 0,1$ con el fin de conseguir menor variación del pH y por tanto repercutir de forma más positiva en la productividad del sistema. Se puede observar que igualmente se cumplen todas las restricciones planteadas. Sin embargo, se puede observar un cambio en la inyección del CO_2 por parte del GPC en comparación con el ensayo anterior, donde ahora se aumenta la frecuencia de inyección con pulso de menor amplitud para conseguir que el pH quede dentro de los límites establecidos. Por tanto, se puede concluir que el algoritmo GPC es una herramienta de gran utilidad para conseguir mantener el pH en los valores óptimos reduciendo el consumo de CO_2 .

Con la solución propuesta en este artículo se han conseguido resultados muy similares a otros trabajos obtenidos en [8], [7] y [9]. En estos trabajos se abordan diferentes estrategias de control en fotobiorreactores tubulares y raceway, tales como un control robusto con QFT o un control PI basado en eventos diferenciando entre el día y la noche. La principal ventaja de esta estrategia frente a las mencionadas anteriormente es que nos permite gestionar de forma intrínseca el tratamiento de las restricciones y la problemática de la variabilidad del pH en la salida del proceso.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el control predictivo generalizado lineal del pH de un reactor tipo *raceway*. En primer lugar, la dinámica del proceso ha sido capturada en forma de modelo de bajo orden en torno al punto de operación. Posteriormente, se procedió al diseño de un controlador predictivo generalizado con restricciones que fue evaluado en simulación mediante dos ensayos. A diferencia de otros trabajos similares de implementación de un control predictivo en un fotobiorreactor *raceway* como en [4], donde se aplica un control predictivo basado en eventos, en este trabajo se ha hecho uso de las restricciones que permite imponer el controlador predictivo en la salida del proceso. El resultado obtenido es satisfactorio, observándose cómo la salida del sistema queda acotada entre los límites establecidos cumpliendo también la señal de control sus restricciones. De este forma se asegura que la productividad

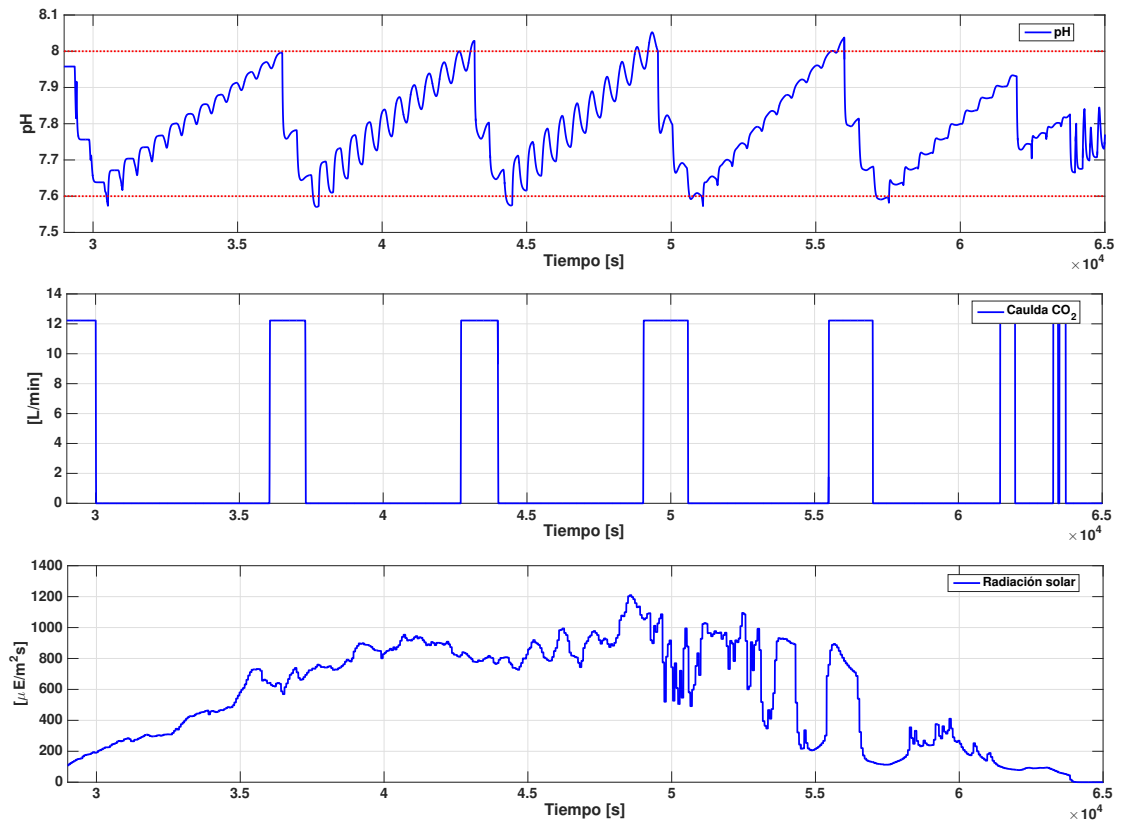


Figura 5: Ensayo de control con límites de la restricción en la salida de $Y_{min} = 0,2$ e $Y_{max} = 0,2$

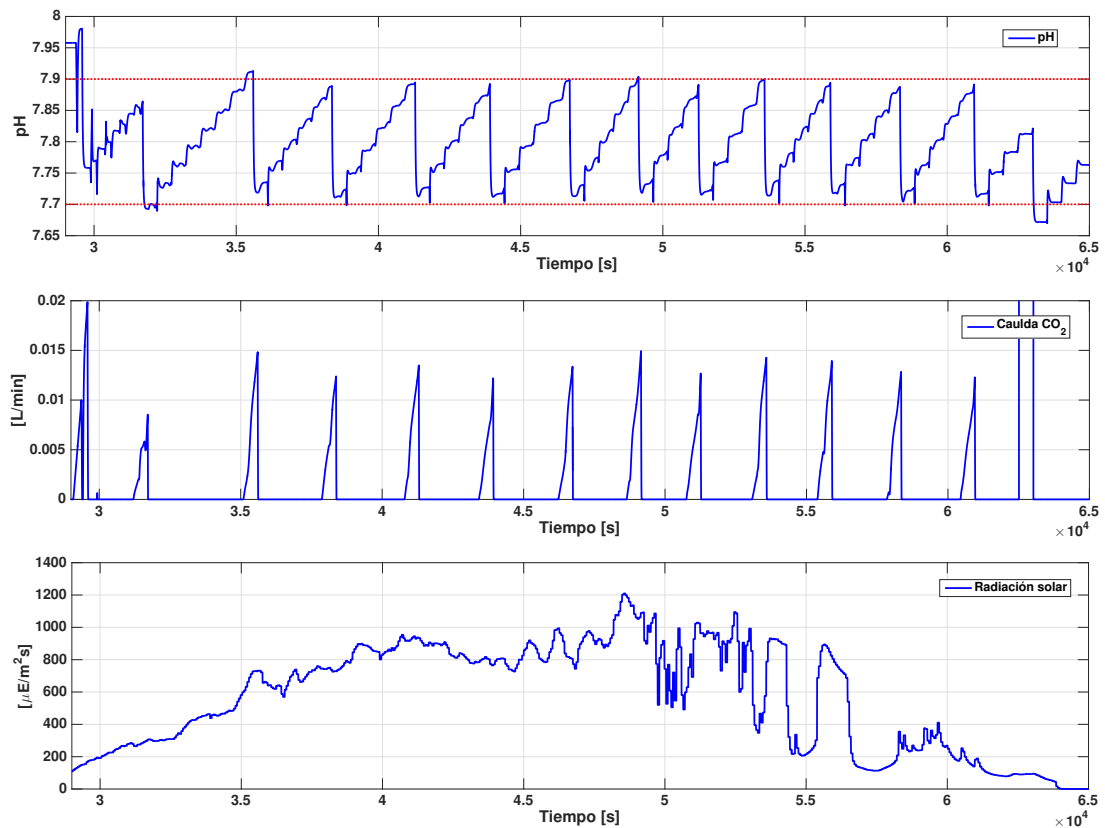


Figura 6: Ensayo de control con límites de la restricción en la salida de $Y_{min} = 0,1$ e $Y_{max} = 0,1$

es máxima siempre que se mantenga el valor de pH lo más cercano al valor de referencia establecido y además se reduce el impacto ambiental debido al decremento de inyección de CO₂ que permite esta estrategia de control.

Como trabajos futuros, se pretende evaluar el comportamiento del algoritmo de control durante varias semanas consecutivas en simulación realizando ensayos con diferentes condiciones externas para observar su comportamiento. Posteriormente se busca implementar el control propuesto en el reactor industrial. Además, se pretende diseñar y evaluar igualmente nuevas versiones no lineales de algoritmos de control predictivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2017-84259-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER, y el programa European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program bajo el proyecto SABANA 727874.

English summary

LINEAR PREDICTIVE CONTROL FOR THE PH IN RACEWAY PHOTOBIOREACTORS

Abstract

This paper presents the implementation of a Generalized Predictive Control (GPC) algorithm for the pH control in a photobioreactor raceway for microalgae. The pH is the most important variable in the microalgae crop growth process, which has a direct influence on the system productivity. The nonlinear dynamics of the pH is affected by other system variables such as CO₂ supply, excess of O₂ due to the photosynthesis process, the solar diation and the biomass concentration. This type of reactors are usually controlled by means of on/off controllers, which do not take into account the process model and the CO₂ consumption. To keep the pH within an specific range is very important and affects directly the system productive. Thus, a constrained predictive control is designed in this work to limit the pH with the optimal values allowing to increase the productivity and to reduce the CO₂ consumption.

Keywords: predictive control, GPC, photobioreactors, simulation.

Referencias

- [1] A. Jebali, F. Ación, C. Gómez, J. Fernández-Sevilla, N. Mhiri, F. Karray, A. Dhoub, E. Molina-Grima, and S. Sayadi, "Selection of native tunisian microalgae for simultaneous wastewater treatment and biofuel production," *Bioresource Technology*, vol. 198, pp. 424 – 430, 2015.
- [2] J. Weissman and R. Goebel, "Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels," (Institute, Golden CO, SERI/STR.), 231st ed. Solar Energy Research., 1987.
- [3] W. J. Oswald and C. G. Golueke, "Biological transformation of solar energy," *Applied Microbiology*, vol. 2, p. 223–262, 1960.
- [4] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Ación, and S. Dormido, "Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture," *Bioresource Technology*, vol. 170, pp. 1–9, 2014.
- [5] T. A. Costache, F. G. Ación, M. M. Morales, J. M. Fernández-Sevilla, I. Stamatina, and E. Molina, "Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors," *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 7627–7637, 2013.
- [6] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Ación, and S. Dormido, "Selective pH and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an event-based approach," *Control Engineering Practice*, vol. 44, pp. 209 – 218, 2015.
- [7] I. Fernández, J. Peña, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and F. G. Ación, "Modelling and control issues of pH in tubular photobioreactors," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 6, pp. 186 – 191, 2010. 11th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology.
- [8] A. Hoyo, J. L. Guzmán, J. C. Moreno, and M. Berenguel, "Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway," in *Actas de las Jornadas de Automática*, (Gijón, Spain), pp. 6–8, Septiembre 2017.

- [9] E. Rodríguez-Miranda, M. Beschi, J. Guzmán, M. Berenguel, and A. Violi, “Daytime/nighttime event-based PI control for the pH of a microalgae raceway reactor,” *Processes*, vol. 7, p. 247, 04 2019.
- [10] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acién, and S. Dormido, “Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture,” *Bioresource Technology*, vol. 170, pp. 1 – 9, 2014.
- [11] I. Fernández, F. G. Acién, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and J. L. Mendoza, “Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production,” *Algal Research*, vol. 17, pp. 67–78, 2016.
- [12] J. L. Mendoza, M. R. Granados, I. de Godos, F. G. Acién, E. Molina, C. J. Banks, and S. Heaven, “Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 54, p. 267–275, 2013.
- [13] M. Berenguel, F. Rodríguez, F. G. Acién, and J. L. García, “Model predictive control of pH in tubular photobioreactors,” *Journal of Process Control*, vol. 14, p. 377–387, 2004.
- [14] E. Sierra, F. G. Acién, J. Fernández, J. García, C. González, and E. Molina, “Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 138, pp. 136–147, 2008.
- [15] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio, and D. Martínez, *Control of Solar Energy Systems*. London, UK: Springer, 2012.
- [16] J. Rossiter, *Model-based Predictive Control – a Practical Approach*. Florida, USA: CRC-Press, 2003.



© 2019 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).