

Control híbrido de pH para un fotobiorreactor *raceway*

Mulero-Martínez, J.I.^{a,*}, Baños, A.^b, Moreno, J.C.¹, Guzmán, J.L.¹

^aDepartamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia, España.

^bDepartamento de Informática y Sistemas, Universidad de Murcia, 30100, Murcia, España

^cDepartamento de Informática, Universidad de Almería, España

To cite this article: Mulero-Martínez, J.I., Baños, A., Moreno, J.C., Guzmán, J.L. 2023. pH hybrid control for an industrial *raceway* photobioreactor. XLIV Jornadas de Automática, 335-339. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.335>

Resumen

En los últimos años, la industria de producción de microalgas ha tenido una gran repercusión debido a su utilidad para la mitigación de los gases de efecto invernadero, tratamiento de residuos, producción de biocombustible, industria de cosméticos, y alimentación animal y humana. Sin embargo, la dinámica de estos sistemas es muy compleja y no lineal por lo que se requieren tanto modelos como estrategias de control avanzadas. En este trabajo se ha propuesto un control reseteado para el pH de un fotobiorreactor industrial *raceway* que mejora el comportamiento del sistema con respecto a otros controladores lineales.

Palabras clave: Sistemas de control híbrido, control de pH, control de fotobiorreactores, sistemas híbridos dinámicos

pH hybrid control for an industrial *raceway* photobioreactor

Abstract

In recent years, the microalgae production industry has had a major impact due to its usefulness in mitigation of greenhouse gases, waste treatment, biofuel production, cosmetics industry, and animal and human food. However, the dynamics of these systems is very complex and non-linear, so both models and advanced control strategies are required. In this work, a reset control has been proposed for the pH variable in a *raceway* industrial photobioreactor that improves the behavior of the system with respect to other linear controllers.

Keywords: Hybrid control systems, pH control, photobioreactor control, Hybrid dynamical systems

1. Introducción

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos con capacidad para desarrollarse en entornos sin tierra fértil y con agua sucia. Captan energía solar y CO₂ y lo transforman en oxígeno y biomasa. Para realizar la fotosíntesis requieren de nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo Guzmán et al. (2021). El carbono se proporciona mediante la inyección de CO₂, sirviendo para regular el pH del sistema Hoyo Sánchez et al. (2022). El resto de nutrientes se suelen aportar de forma directa sobre el medio acuoso en el que se desarrollan las microalgas, o indirectamente usando aguas residuales, implicando por tanto también un mecanismo de depuración de estas aguas,

que podrán usarse posteriormente por ejemplo como agua de riego, al tiempo que la biomasa generada podrá usarse como alimento para animales o como biocombustible. Estas son aplicaciones típicas del producto generado en fotobiorreactores abiertos como los *raceway*. Pero las microalgas también pueden destinarse directamente al consumo humano, ya sea a nivel nutritivo o cosmético. Es el caso de las microalgas producidas en fotobiorreactores cerrados, donde las condiciones de operación están mucho más controladas y el nivel productivo es menor.

Los fotobiorreactores industriales más extendidos son los *raceway*, reactores abiertos y por tanto sometidos a fuentes de

*Autor para correspondencia: juan.mulero@upct.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

contaminación externas, más baratos que los cerrados, estructuralmente más sencillos y con un menor consumo energético. El crecimiento de las algas está directamente relacionado con la temperatura del medio, el pH y el oxígeno disuelto. La más importante de todas estas variables es el pH, pues es la que presenta más variaciones como consecuencia del proceso biológico, y es la que condiciona fuertemente la velocidad de crecimiento de las algas. Por tanto es sin duda necesario llevar a cabo un adecuado control de esta variable.

En la literatura se han utilizado diferentes estrategias para manipular el CO₂ con el fin de regular el pH en fotobiorreactores. Desde controladores todo-nada Acién et al. (2001) a algoritmos de control predictivo, Berenguel et al. (2004c); Yoo et al. (2016); Fernández et al. (2016); Pawłowski et al. (2018), enfoques de control basados en eventos, Pawłowski et al. (2014b, 2015); Rodríguez-Miranda et al. (2019), soluciones libres de modelo Tebbani et al. (2016), PID con controladores feedforward Fernández et al. (2010), PID con filtro para robustez usando compensación dinámica basada en controladores basados en modelos de Wiener Pawłowski et al. (2019), controladores robustos Hoyo Sánchez et al. (2022) y Controladores Activos de Rechazo de Perturbaciones (ADRC) Carreño-Zagarra et al. (2019). La dinámica no lineal y la presencia de saturación del actuador (debido al uso de una válvula para la inyección de CO₂) para este proceso sugieren que el uso de estrategias de control avanzadas producirá mejores resultados. En algunos trabajos, el problema de la restricción de control se abordó mediante el uso de MPC, mediante soluciones clásicas anti-windup, o mediante técnicas basadas en control interpolado Moreno et al. (2021). En este trabajo se propone una estrategia de control no lineal capaz de tratar indirectamente con las restricciones en el actuador, basada en el uso de un control proporcional-integral más un integrador de Clegg (PI+CI) Baños and Barreiro (2012).

El trabajo se ha estructurado en 5 secciones. En primer lugar se introduce el problema, a continuación se describen los aspectos más relevantes del fotobiorreactor. En las secciones 3 y 4 se muestran los detalles del diseño del controlador y los resultados obtenidos en simulación comparándolos con un PI, y se finaliza con un apartado de conclusiones.

2. Descripción del proceso

Durante el desarrollo del presente trabajo, se ha utilizado el fotobiorreactor *raceway* localizado en el centro IFAPA de la Junta de Andalucía que se encuentra anexo a la UAL como reactor de referencia y para la adquisición de datos utilizados en las simulaciones de este trabajo (Figura 1). Se dispone de dos de ellos, uno utiliza agua limpia y un aporte externo de nutrientes, mientras que el segundo utiliza aguas residuales provenientes de la UAL. En el presente trabajo se utilizará el primero de ellos, aunque la única diferencia radica en el agua utilizada y el aporte de nutrientes.

Los reactores están compuestos por dos canales de 40 m de longitud, 1 m de ancho y 30 cm de profundidad, unidos en sus extremos por curvas de 180°. Por lo tanto, cada reactor cuenta con una superficie total de 80 m², lo cual proporciona una relación entre el volumen y el nivel del medio de 800 L/cm.

A pesar de contar con una profundidad de 30 cm, la altura de cultivo óptima se encuentra alrededor de los 15 cm.

El mezclado e impulsión del medio se realiza mediante una rueda de paletas de aluminio, con un diámetro de 1.2 m y formada por 8 palas. La misma es accionada por un grupo motorreductor controlado eléctricamente por medio de un variador de frecuencia, de modo que se pueda proporcionar al fluido una velocidad constante de 0.2 m/s.

En el foso que se encuentra justo detrás de las palas se realiza la inyección de aire y de CO₂, a través de 3 discos difusores. El mismo se encuentra a 1.8 m de distancia de las palas impulsoras y presenta forma cilíndrica con un diámetro 65 cm y 1 m de profundidad.



Figura 1: Fotobiorreactores *raceway* disponibles en las instalaciones del Convenio UAL-IFAPA

El sistema dispone de sensores de nivel, temperatura, pH y oxígeno disuelto. El pH y el oxígeno disuelto son medidos en dos puntos distintos: el primero se encuentra justo después del foso, mientras que el segundo está al final del segundo canal, justo antes de las palas. Este último es el punto más desfavorable y difícil de controlar, y usualmente es el objetivo de las estrategias de control implementadas en este sistema.

Los reactores se encuentran inoculados con microalgas de la cepa *Scenedesmus*, la cual se caracteriza por su adaptabilidad y su buen crecimiento en reactores de exterior. Su resistencia a los contaminantes la convierte en una excelente cepa para el tratamiento de aguas residuales. Su pH óptimo se encuentra en el rango de 7.0 a 9.0 y la máxima actividad fotosintética a una temperatura en el rango comprendido entre 26 y 34 °C Barceló-Villalobos et al. (2019).

El control del pH es un problema no lineal que puede ser linealizado en ciertas circunstancias y su regulación se consigue con la inyección de CO₂ Berenguel et al. (2004b). Un modelo simple que captura la dinámica del pH es el mostrado en las siguientes ecuaciones (Caparroz et al., 2023):

$$pH(s) = \frac{K_1}{(1 + \tau s)} \frac{K_2 w_n^2}{(s^2 + 2\delta w_n s + w_n^2)} e^{-t_r s} CO_2(s) + \frac{K_r}{(1 + \tau_r s)} I_{sat}(s) \quad (1)$$

$$pH(s) = \frac{TF_1(s)TF_2(s)CO_2(s) + TF_3(s)I_{sat}(s)}{TF_3(s)I_{sat}(s)} \quad (2)$$

donde pH es el pH del medio, CO_2 es el porcentaje de apertura de la válvula e I_{sat} un valor saturado de radiación global Berenguel et al. (2004b).

Como se puede observar en la ecuación (1), la dinámica del pH con respecto al CO_2 viene dada por un término de primer orden con retardo ($TF_1(s) = \frac{K_1 e^{-\tau s}}{1 + \tau s}$) que marca la dinámica dominante del proceso, junto a una función de transferencia de segundo orden ($TF_2(s)$) que representa las oscilaciones existentes en el sistema debido a las inyecciones de CO_2 que se van atenuando por la recirculación del medio a lo largo del receptor solar. La función $TF_3(s)$ representa el efecto sobre amortiguado de la radiación solar sobre el pH como un efecto la fotosíntesis. Los parámetros de las funciones toman valores particulares dependiendo del tipo de reactor, de la cepa y de las condiciones meteorológicas Guzmán et al. (2021).

3. Diseño del Controlador

Consideraremos el problema de seguimiento de una señal de referencia escalón y el rechazo de de perturbaciones. La señal observada sobre el sistema es el pH del cultivo, encontrándose principalmente influido por la apertura de la válvula de gas CO_2 (entrada del sistema) y por la radiación solar (perturbación), tal y como se comentó en la sección anterior Pawlowski et al. (2014a). El porcentaje de apertura de la válvula está restringido al intervalo $[0, 1]$; esto significa que además de la no linealidad intrínseca del sistema, existe un elemento de saturación en la señal de control.

Para controlar el fotobiorreactor se ha propuesto un controlador reset como suma ponderada de un controlador proporcional-integral más un integrador de Clegg (PI+CI), Baños and Barreiro (2012). El comportamiento del CI es bastante simple: un integrador lineal siempre que la señal de error es no nula y, una ley de reseteo que, en su versión más sencilla, instantáneamente proyecta el estado del CI a cero cuando la señal de error cruza por cero.

3.1. El integrador de Clegg

Como sistema híbrido, y utilizando la representación de inclusiones híbridas Goebel et al. (2012), el integrador de Clegg (Clegg (1958), Krishnan and Horowitz (1974)) se puede representar mediante un sistema híbrido con un estado $(x_r, q) \in \mathbb{R} \times \{1, -1\}$ y una entrada $e \in \mathbb{R}$ (usualmente la señal de error en un sistema de control realimentado). Aquí x_r es un estado que representa la salida del controlador, siendo la integral de la señal e , y $q \in \{1, -1\}$ es un estado discreto que se utiliza para detectar cruces o saltos de la señal de error al pasar por el valor cero. Está dado por:

$$CI: \begin{cases} \dot{x}_r = e & , qe \leq 0 \\ \begin{pmatrix} x_r^+ \\ q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r \\ q \end{pmatrix} & , qe \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

La primera ecuación es la ecuación de flujo (el estado q permanece constante y su ecuación se elimina por simplicidad), y

la segunda ecuación es la ecuación de salto. Cuando se activa la condición de salto ($qe \geq 0$) se resetea a cero el valor del estado x_r y se cambia de signo el estado discreto q . Para una descripción más detallada de este controlador véase Baños and Barreiro (2012, 2022).

La señal de error e se determina directamente como la diferencia entre la consigna de pH y la señal medida de pH en la planta. Modificaremos este controlador para tener en cuenta la existencia de retardo en la planta. Para ello consideraremos una superficie $S(e) = e + \theta \dot{e}$, de forma que el sistema tenga una cierta capacidad de predicción del valor de pH en $t + \theta$. La banda θ se fijará al tamaño del retardo de la planta. De esta forma el integrador de Clegg modificado viene dado por (3) con una condición de flujo dada por $qS(e) \leq 0$, y una condición de salto dada por $qS(e) \geq 0$.

3.2. Un controlador PI+CI para control de pH

El controlador resetado PI+CI consta de dos estados x_{r1} y x_{r2} , correspondientes a los dos integradores, y un estado discreto, que de nuevo determina las regiones del espacio de estados en que el sistema está fluyendo o saltando, denotado por $q \in \{-1, +1\}$. Formalmente, el controlador resetado se puede expresar en los siguientes términos:

$$PI + CI: \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_{r1} \\ \dot{x}_{r2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} e, & qS(e) \geq 0, \\ \begin{pmatrix} x_{r1}^+ \\ x_{r2}^+ \\ q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{r1} \\ 0 \\ -q \end{pmatrix}, & qS(e) \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

siendo e la señal de error. La salida del controlador u viene dada por

$$u = K_p \left(\frac{1}{T_i} ((1 - p_r) x_{r1} + p_r x_{r2}) + e \right) \quad (5)$$

Además de la constante proporcional k_p y del tiempo integral T_i , existe un parámetro adicional p_r indicando el peso de cada integrador en la salida del controlador reset.

La salida del controlador reset representa el flujo de CO_2 que se inyecta en el fotobiorreactor. Al no extraer CO_2 de la planta, la salida de control se encuentra saturada interiormente por cero. Este suministro solamente puede provocar el descenso del pH de la planta. Para incrementar el pH es necesaria la ayuda de las perturbaciones del sistema y muy especialmente de la radiación. Si el nivel de pH, y_{ph} se encuentra inicialmente por debajo de la consigna r_{ph} , el integrador se va cargando, lo que provoca una acción de control demasiado agresiva cuando el pH supera el valor de consigna. Esto a su vez genera un descenso excesivo del pH. Por tanto, inicialmente hasta que no se alcance el valor consignado ($e < 0$) la mejor estrategia es no cargar los integradores saturando inferiormente la señal de error por cero.

Así pues, consideraremos una entrada de control efectiva e^* dada por

$$e^* = \begin{cases} 0, & \text{si } y_{ph} \leq r_{ph}, \\ r_{ph} - y_{ph}, & \text{si } y_{ph} > r_{ph}. \end{cases}$$

La señal de radiación d_{rad} presenta la forma aproximada de una gaussiana donde la radiación máxima ocurre en $t = t_c$ con amplitud A , y la mayor parte de la energía de la radiación se encuentra en el intervalo $[t_1 = t_c - \Delta, t_2 = t_c + \Delta]$. Es importante

que los integradores no estén muy cargados fuera del intervalo $[t_1, t_2]$. En particular para $t \geq t_2$ la acción de control debe ser lo más pequeña posible. Esto se consigue conectando sólo el integrador de Clegg que deberá estar a un valor muy bajo. Además cuanto mayor es la radiación mayor debería ser el esfuerzo de control, por lo que cerca de $t = t_c$ es razonable considerar que la acción del integrador lineal debería ser mayor que la del integrador de Clegg. Por tanto, una posible estrategia sería considerar un porcentaje de reset variable de la forma $p_r(t) = 1 - tri(t)$, donde $tri(t)$ representa un pulso triangular unitario centrado en t_c y de anchura 2Δ :

$$tri(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t-t_c|}{\Delta}\right), & \text{cuando } |t-t_c| < \Delta, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Para el ajuste del controlador PI base del PI-CI es necesario disponer de un modelo lineal simplificado del sistema en torno al punto de operación. Este modelo simplificado tiene en cuenta la estructura del reactor *raceway*, la distribución de sensores y actuadores, y la dinámica de los datos observados. Según trabajos previos, Berenguel et al. (2004a), Pawłowski et al. (2018), el modelo lineal que relaciona el cultivo de pH (variable y) y la apertura de la válvula de gas CO_2 (variable u) viene dado por la siguiente función de transferencia de primer orden con retardo en el tiempo:

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-hs} U(s), \quad (6)$$

donde k es la ganancia en continua del proceso, τ es la constante de tiempo y h el retardo temporal en la entrada. Este retardo está producido principalmente por la distancia entre el punto de inyección de CO_2 y el punto de sensorización de pH.

4. Resultados

En esta sección se resumen los resultados de simulación para el esquema de control planteado. Se llevó a cabo una comparación entre la respuesta del controlador reset PI+CI y el controlador PI lineal sin anti-windup ajustado mediante la regla de sintonía basada en el control de modelo interno de Skögestad (SIMC), Vilanova and Visioli (2012). El modelo de planta lineal para el PI lineal es el mismo que el del PI base del controlador PI+CI tal y como aparece en (6). Los parámetros del modelo (6) vienen dados por $k = -2,3$, $\tau = 5200$ y $h = 400$ seg. Aplicando la regla SIMC se consiguieron los siguientes parámetros: ganancia proporcional $k_p = -2$ y tiempo integral $T_I = 4500$. Los parámetros del controlador PI+CI, tras realizar la sintonía, fueron los siguientes: $k_p = -1$, $T_I = 3200$, $\theta = h = 400$, y un porcentaje de reset según $1 - tri(t)$, donde $tri(\cdot)$ representa un pulso triangular unitario con límite inferior $t_1 = 3,33 \cdot 10^4$ seg, y límite superior $t_2 = 7,3968 \cdot 10^4$ seg.

Las simulaciones se llevaron a cabo en MATLAB/Simulink utilizando un modelo dinámico no lineal completo para la producción de microalgas. Este modelo se fundamenta en principios tanto biológicos como de dinámica de fluidos que intervienen en el cultivo de microalgas, Fernández et al. (2014).

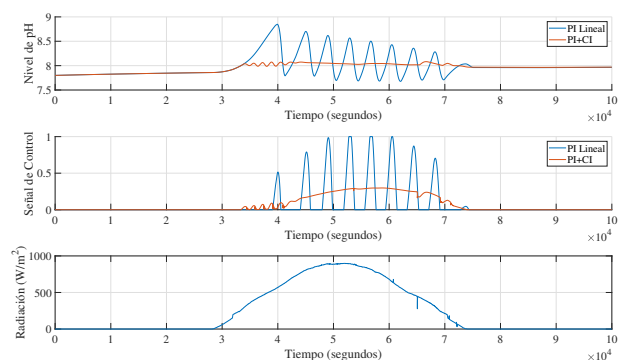


Figura 2: Nivel de pH y acción de control para el controlador PI lineal (azul) y reset PI+CI con p_r variable (naranja), frente a una perturbación de radiación.

La Figura 2 muestra los resultados para un día despejado, con una perturbación de radiación solar extraída de datos reales. Esta perturbación se comporta aproximadamente por una gaussiana de amplitud 900 W/m^2 , centrada en $5,115 \cdot 10^4$ seg. y dispersión de $4,57 \cdot 10^4$ seg. El pH de referencia se estableció en 8, mientras que el nivel inicial se encontraba fijado a 7,8. El controlador PI lineal es poco robusto frente a perturbaciones produciendo una desviación superior a 0,8 con respecto a la referencia, esto es un porcentaje de overshoot del 10 % sobre el valor deseado. Las variaciones de pH cuando se produce la perturbación son muy agresivas. Fuera de la ventana de perturbación el controlador lineal logra estabilizar el pH en un valor cercano a la referencia. En cambio, con el controlador PI+CI se ha conseguido una desviación máxima de aproximadamente 0,08, lo cual representa un 1 % del valor deseado.

	PI lineal	PI+CI
ISE	5275	72,06
IAE	$1,672 \cdot 10^4$	1487
ITAE	$6,916 \cdot 10^8$	$7,737 \cdot 10^7$

Tabla 1: Error cuadrático integral (ISE), error absoluto integral (IAE) e integral del error absoluto ponderado (ITAE). Comparación de un PI lineal y un controlador reset basado en PI+CI

Para comparar el rendimiento de los controladores también se ha recurrido a los índices de rendimiento siguientes: error cuadrático integral (ISE), error absoluto integral (IAE) e integral del error absoluto ponderado (ITAE). Estos errores se recogen en la Tabla 1. La medida ISE para el PI lineal es casi 75 veces mayor que para el PI+CI. Esto se debe a que se producen grandes errores en el esquema lineal que se ven penalizados por esta métrica. El controlador reset tiende a eliminar grandes errores rápidamente, sin embargo tolera pequeños errores que persisten durante la ventana de perturbación. Esto ha conducido a una respuesta rápida pero con una oscilación considerable de baja amplitud. El IAE ofrece una medida de mayor empeoramiento del controlador lineal frente al reset en un factor de 10^3 . En el estacionario, fuera de la ventana de perturbación, los dos controladores se comportan de forma similar (seguimiento de la referencia). Sin embargo, con el índice ITAE, que penaliza los errores con el tiempo, el PI+CI todavía es diez veces superior al PI lineal.

A la vista de los resultados de la Figura 2 y de la Tabla 1 se sigue que el PI+CI permite hacer un buen seguimiento de trayectorias de referencia al mismo tiempo que rechaza razonablemente bien las perturbaciones del sistema. En la Figura 3 se muestra una simulación del sistema de control de pH para un perfil de radiación diferente, un día con algunas nubes, que además de cambios lentos presenta cambios rápidos en un intervalo de tiempo.

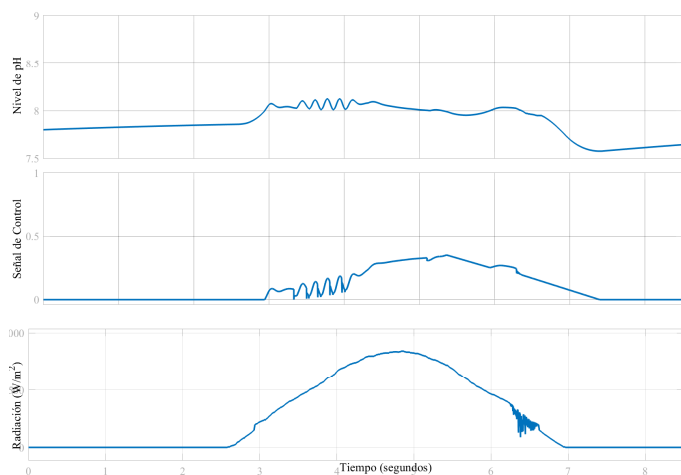


Figura 3: Nivel de pH y acción de control para el controlador reset PI+CI con p_r variable.

5. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un controlador reset basado en un PI+CI para tratar con el control del pH en un sistema de producción industrial de microalgas. El controlador se ha comparado en simulación con un control PI lineal, donde la acción de control se halla saturada inferiormente por cero. Las simulaciones han mostrado un mejor rendimiento del controlador reset frente al controlador lineal en experimentos con datos extraídos de ensayos reales. Esto demuestra la mayor robustez del controlador reset frente a perturbaciones.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112709RB, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

Ación, F. G., Fernández, J. M., Sánchez, J. A., Molina, E., Chisti, Y., 2001. Airlift- driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: Assessment of design and performance. *Chemical Engin. Sci.* 56, 2721–2732.

Baños, A., Barreiro, A., 2012. *Reset Control Systems*. AIC Series. Springer, London.

Baños, A., Barreiro, A., 2022. Reset control systems: the zero-crossing resetting law. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* 46, 101259.

Barceló-Villalobos, M., Gómez Serrano, C., Sánchez Zurano, A., Alameda García, L., Esteve Maldonado, S., Peña, J., Ación Fernández, F. G., 2019. Variations of culture parameters in a pilot-scale thin-layer reactor and their influence on the performance of *scenedesmus almeriensis* culture. *Bioresource Technology Reports* 6, 190–197.

Berenguel, M., Rodríguez, F., Ación, F., García, J., 2004a. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control* 14 (4), 377–387.

Berenguel, M., Rodríguez, F., Ación, F. G., García, J., 2004b. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control* 14, 377–387.

Berenguel, M., Rodríguez, F., Ación, F. G., García, J., 2004c. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control* 14 (4), 377–387.

Caparroz, M., Otálora, P., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., En Prensa 2023. Modelado y control del pH en la producción de microalgas en reactores raceway usando técnicas de adaptación de parámetros. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*.

Carreño-Zagarra, J. J., Guzmán, J. L., Moreno, J. C., Villamizar, R., 2019. Linear active disturbance rejection control for a raceway photobioreactor. *Control Engineering Practice* 85 (December 2018), 271–279.

Clegg, J. C., 1958. A nonlinear integrator for servomechanisms. *AIEE Transactions, Applications and Industry* 77, 41–42.

Fernández, I., Ación, F. G., Berenguel, M., Guzmán, J. L., Jun. 2014. First principles model of a tubular photobioreactor for microalgal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53 (27), 11121–11136.

Fernández, I., Berenguel, M., Guzmán, J. L., Ación, F. G., de Andrade, G. A., Pagano, D. J., 2016. Hierarchical control for microalgae biomass production in photobioreactors. *Control Engineering Practice* 54, 246–255.

Fernández, I., Peña, J., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., 2010. Modelling and control issues of pH in tubular photobioreactors. In: *IFAC World Congress Proceedings*. Vol. 43. pp. 186–191.

Goebel, R., Sanfelice, R. G., Teel, A. R., 2012. *Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability, and Robustness*. Princeton University Press.

Guzmán, J. L., Ación, F. G., Berenguel, M., 2021. Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18, 1–18.

Guzmán, J. L., Ación, F. G., Berenguel, M., 2021. Modelado y control de la producción de microalgas en fotobioreactores industriales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 1–18.

Hoyo Sánchez, J., Guzmán, J. L., Moreno Úbeda, J. C., Baños Torrico, A., 2022. Control robusto del pH en un fotobioreactor raceway. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 19 (3), 274–283.

Krishman, K. R., Horowitz, I. M., 1974. Synthesis of a nonlinear feedback system with significant plant-ignorance for prescribed system tolerances. *International Journal of Control* 19, 689–706.

Moreno, J. C., Mercader, P., Guzmán, J. L., Baños, A., Gutman, P.-O., 2021. Evaluation of an interpolated controller in an industrial photobioreactor. *IEEE Access* 9, 24406–24415.

Pawlowski, A., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., 2019. Control system for pH in raceway photobioreactors based on wiener models. *IFAC-PapersOnLine* 52 (1), 928–933.

Pawlowski, A., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., Dormido, S., Jan 2018. Application of predictive feedforward compensator to microalgae production in a raceway reactor: A simulation study. *Energies* 11 (1).

Pawlowski, A., Mendoza, J., Guzmán, J., Berenguel, M., Ación, F., Dormido, S., 2014a. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *Bioresource Technology* 170, 1–9.

Pawlowski, A., Mendoza, J., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., Dormido, S., 2014b. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *Bioresource technology* 170, 1–9.

Pawlowski, A., Mendoza, J., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., Dormido, S., 2015. Selective pH and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an event-based approach. *Control Engineering Practice* 44, 209–218.

Rodríguez-Miranda, E., Beschi, M., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Visioli, A., apr 2019. Daytime/Nighttime Event-Based PI Control for the pH of a Microalgae Raceway Reactor. *Processes* 7 (5), 247.

Tebhani, S., Titica, M., Join, C., Fliess, M., Dumur, D., 2016. Model-based versus model-free control designs for improving microalgae growth in a closed photobioreactor: Some preliminary comparisons. In: *IEEE on Control and Automation (MED)*, 2016 24th Mediterranean Conference Proceedings. pp. 683–688.

Vilanova, R., Visioli, A., 2012. *PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches*. Advances in Industrial Control. Springer London.

Yoo, S. J., Jeong, D. H., Kim, J. H., Lee, J. M., 2016. Optimization of microalgal photobioreactor system using model predictive control with experimental validation. *Bioprocess and biosystems engineering* 39 (8), 1235–1246.