

Jornadas de Automática

Regulación de pH en *raceway* de microalgas con Extremum Seeking Control con dither fuera del ancho de banda y compensación de desfase

González-Hernández, José^{a,*}, Dewasme, Laurent^b, Vande Wouwer, Alain^b, Guzmán, José Luis^a, Moreno, José Carlos^a

^aUniversidad de Almería, CIESOL, ceia3, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España.

^bSystems, Estimation, Control and Optimization (SECO), University of Mons, B-7000, Mons, Belgium.

To cite this article: González-Hernández, José, Dewasme, Laurent, Vande Wouwer, Alain, Guzmán, José Luis, Moreno, José Carlos. 2025. pH control in microalgae raceway with Extremum Seeking with out-of-bandwidth dither and phase shift compensation. Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12190>

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una estrategia Extremum Seeking Control (ESC) aplicada a la regulación del pH en un *raceway* de microalgas. La dinámica del sistema presenta una constante de tiempo variable y muy lenta, lo que impide ubicar la señal de *dither* dentro del ancho de banda efectivo del sistema. Por ello, el *dither* se sitúa fuera de dicho ancho de banda, generando atenuación y desfase en la señal modulada. Para contrarrestar este efecto, se ajusta la frecuencia de corte de un filtro paso alto en la etapa de demodulación, de modo que el desfase total, resultado de la suma del desfase del sistema y el del filtro, se ubique aproximadamente en el centro del rango esperado. Esta estrategia mejora la robustez y estabilidad del ESC frente a las variaciones dinámicas del sistema. Además, se incorpora una acción feedforward para compensar perturbaciones medibles provocadas por la radiación incidente. Los resultados de simulación demuestran la efectividad de la propuesta en mantener el pH en el valor óptimo bajo condiciones variables.

Palabras clave: ESC, Microalgas, Feedforward, Perturbaciones medibles

pH control in *raceway* photobioreactors using Extremum Seeking with out-of-bandwidth dither and phase shift compensation

Abstract

This work presents the design and implementation of an Extremum Seeking Control (ESC) approach applied to pH regulation in a microalgae raceway. The dynamics of the system presents a variable and very slow time constant, which prevents the dither signal from being located within the effective bandwidth of the system. Therefore, the dither is placed outside the effective bandwidth, generating attenuation and phase shift in the modulated signal. To counteract this effect, the cutoff frequency of a high-pass filter in the demodulation stage is adjusted so that the total phase shift - resulting from the sum of the system and filter phase shifts - is approximately in the centre of the expected range. This strategy improves the robustness and stability of the ESC to system dynamic variations. In addition, a feedforward action is incorporated to compensate for measurable disturbances caused by incident radiation. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposal in maintaining the pH at the optimum value under varying conditions.

Keywords: ESC, Microalgae, Feedforward, Measurable disturbances

*Autor para correspondencia: j.gonzalez@ual.es

1. Introducción

Las microalgas son organismos fotosintéticos unicelulares de rápido crecimiento que fijan dióxido de carbono (CO_2) y transforman nutrientes, lo que las convierte en una solución prometedora para la biorremediación y la producción sostenible de biomasa con valor añadido (Acién et al., 2012; Tapie and Bernard, 1988; Nordio et al., 2022).

La producción a gran escala de microalgas se realiza comúnmente en fotobiorreactores, los cuales se dividen en sistemas cerrados y abiertos. Los primeros permiten un control preciso de las condiciones internas, aunque con mayores costos de operación. Por otro lado, los sistemas abiertos, particularmente los reactores tipo *raceway*, destacan por su simplicidad constructiva y bajo costo, lo que los hace especialmente adecuados para aplicaciones extensivas como el tratamiento de aguas o la producción de biomasa no destinada al consumo humano (Johnson et al., 1988; Acién et al., 2017).

El desempeño de los *raceway* está fuertemente condicionado por la radiación solar y la temperatura, ya que la iluminación artificial y el control térmico resultan económicamente costoso a gran escala (González-Hernández et al., 2022). Además, la propia evolución biológica del cultivo —a través de cambios en la tasa de crecimiento, consumo de nutrientes o actividad fotosintética varía a lo largo del ciclo diurno y entre estaciones. Esta combinación de perturbaciones externas no controlables y dinámica interna variable genera un entorno difícil para la aplicación de estrategias de control tradicionales, que requieren modelos precisos y estables.

En este contexto, se vuelve necesario recurrir a enfoques de control sin modelo, capaces de adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Una estrategia particularmente adecuada para estos casos es el Extremum Seeking Control (ESC), que permite optimizar en tiempo real una variable de interés sin requerir un modelo explícito del sistema (Dewasme and Vande Wouwer, 2020). Esta característica resulta especialmente atractiva para reactores tipo *raceway*, en los que la dinámica del proceso varía de forma continua debido a las condiciones ambientales fluctuantes y a los procesos biológicos internos. Se han reportado estudios a escala de laboratorio en fotobiorreactores planos, donde el ESC permitió maximizar la tasa de producción de biomasa bajo condiciones controladas, validando así la capacidad de la técnica para adaptarse a la dinámica propia de los cultivos de microalgas (Feudjio Letchindjio et al., 2021).

Por otra parte, la eficacia del ESC también ha sido corroborada en instalaciones industriales de mayor envergadura como es el caso de su implementación para optimizar simultáneamente la producción y el consumo de energía térmica en un sistema de destilación por membranas, evidenciando su potencial para mejorar la eficiencia de procesos complejos (Gil et al., 2022).

Un primer aspecto crucial al considerar la aplicación del ESC en reactores *raceway* es que su eficacia solo es viable durante el periodo diurno. Esto se debe a que, en ausencia de luz, las microalgas modifican drásticamente su metabolismo, interrumpiendo la fotosíntesis y entrando en una fase respiratoria que altera el comportamiento del pH de forma no correlacionada con la radiación solar. Esta limitación temporal condiciona directamente el diseño del ESC, ya que obliga a garantizar

una convergencia rápida hacia el punto óptimo dentro del corto intervalo de tiempo disponible durante el día. Sin embargo, el sistema presenta una dinámica lenta, determinada por largos tiempos de residencia del medio y la inercia propia del proceso biológico. Esto restringe severamente la frecuencia a la que podría aplicarse un *dither* dentro del ancho de banda del sistema.

Ante esta incompatibilidad entre la lentitud de la dinámica y la necesidad de velocidad en la convergencia, se adopta una solución no convencional: diseñar el *dither* fuera del ancho de banda del sistema. Esta decisión, aunque en principio subóptima desde el punto de vista clásico, permite alcanzar convergencia dentro del periodo operativo diurno. No obstante, también introduce desafíos técnicos adicionales, principalmente el desfase y la atenuación que sufre la señal senoidal al atravesar el sistema, lo cual compromete la calidad de la estimación del gradiente y, por ende, la eficacia del control.

Para contrarrestar este efecto, se propone un diseño cuidadoso del filtro paso alto (HPF - *High Pass Filter*) utilizado para la demodulación. Conociendo de antemano la frecuencia del *dither* y estimando el desfase introducido tanto por el sistema como por el filtro, se ajusta la frecuencia de corte del HPF de modo que el desfase total quede aproximadamente centrado en el rango operativo, mejorando así la robustez del sistema ante variaciones en la dinámica.

Finalmente, el sistema está expuesto a perturbaciones ambientales rápidas, como los cambios bruscos en la radiación durante días nublados. Estas perturbaciones al ser medibles en el sistema se pueden mitigar mediante la acción de un compensador por adelantado o *feedforward* (Guzmán and Hägglund, 2024a), lo que permite anticipar parcialmente estas perturbaciones y reducir su impacto sobre el lazo de control.

En conjunto, estas adaptaciones permiten aplicar una estrategia ESC robusta y eficaz para la regulación del pH en un entorno complejo y dinámico como el de los fotobiorreactores *raceway*, abriendo así nuevas posibilidades de optimización autónoma en sistemas biotecnológicos de gran escala.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactores Raceway

El sistema de referencia empleado en este estudio es un fotobiorreactor abierto tipo *raceway* de 80 m², ubicado en el centro IFAPA de la Junta de Andalucía, en las instalaciones anexas a la Universidad de Almería (Figura 1). El reactor está compuesto por dos canales paralelos de 40 metros de longitud, 1 metro de ancho y una profundidad total de 0,3 metros, aunque la altura operativa óptima del cultivo se mantiene en torno a los 0,15 metros (González-Hernández et al., 2022).



Figura 1: *raceway* 80 m² IFAPA

El control del pH en sistemas de cultivo de microalgas representa un desafío debido a su naturaleza no lineal, aunque bajo ciertas condiciones puede aproximarse mediante modelos lineales. Un modelo ampliamente aceptado para describir esta dinámica fue propuesto por (Berenguel et al., 2004), y se expresa como:

$$pH(s) = \frac{K_1}{\tau s + 1} \frac{K_2 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} e^{-\tau_r s} V_{CO_2}(s) + \frac{K_r}{\tau_r s + 1} I_{solar}(s) \quad (1)$$

La ecuación (1) representa el pH como la suma de un primer orden con retardo que recoge la respuesta al caudal de CO_2 , un segundo orden amortiguado que explica las oscilaciones originadas por la inyección-recirculación del gas, y un primer orden ligado a la irradiancia y a la fotosíntesis. Los parámetros, especialmente la ganancia estática K_1 y la constante de tiempo τ , cambian a lo largo del día con la luz, la temperatura y el estado biológico del cultivo (Guzmán et al., 2020; Caparroz et al., 2024)

2.2. Simulador Raceway

Para evaluar la estrategia de control se implementó un simulador propio de primeros principios cuya base matemática sigue la formulación propuesta en Guzmán et al. (2020). El esquema se divide en dos bloques interconectados: un *modelo biológico*, responsable de calcular la tasa de crecimiento de las microalgas, y un *modelo dinámico*, que resuelve los balances de masa y energía del fotobiorreactor, incluidos los flujos de carbono y oxígeno y los intercambios térmicos entre las diferentes zonas del cultivo.

2.2.1. Modelo biológico

La producción de biomasa se cuantifica mediante la tasa de crecimiento específica μ , dependiente de la irradiancia media disponible (I_{av}), la temperatura (T), el pH, la concentración de oxígeno disuelto (O_2) y la respiración microbiana (m). Siguiendo la formulación de Sánchez-Zurano et al. (2021), se emplea un término fotodependiente $\mu(I_{av})$ ponderado por tres factores adimensionales $\mu(\cdot) \in [0, 1]$ que recogen los efectos de T , pH y O_2 , suponiendo que los nutrientes (N, P, etc.) no son limitantes:

$$\mu = \mu(I_{av}) \overline{\mu(T)} \overline{\mu(pH)} \overline{\mu(O_2)} - m. \quad (2)$$

2.2.2. Modelo dinámico

El reactor se modela como un tanque perfectamente mezclado, de modo que las variables de estado principales, biomasa (C_b), oxígeno disuelto ($[O_2]$) y carbono inorgánico total ($[C_T]$), se rigen por las siguientes ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dC_b}{dt} = C_b \left(\mu - d_r - \frac{Q_d}{V_r} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[O_2]}{dt} = & \frac{Q_d}{V_r} ([O_2^*] - [O_2]) + \mu \frac{Y_{O_2}}{M_{O_2}} C_b \\ & + K_{laO_2}^{\text{atm}} ([O_2^*] - [O_2]) + K_{laO_2} ([O_2^{\text{iny}}] - [O_2]) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[C_T]}{dt} = & \frac{Q_d}{V_r} ([C_{T\text{in}}] - [C_T]) - \mu \frac{Y_{CO_2}}{M_{CO_2}} C_b \\ & + K_{laCO_2}^{\text{atm}} ([CO_2^*] - [CO_2]) + K_{laCO_2} ([CO_2^{\text{iny}}] - [CO_2]) \end{aligned} \quad (5)$$

La ecuación (3) combina la producción celular, la muerte celular (d_r) y el efecto de la dilución (Q_d/V_r). En (4), la dinámica de $[O_2]$ resulta de la dilución, la fotosíntesis (donde Y_{O_2}/M_{O_2} representa la conversión de gramos de biomasa a moles de oxígeno), la transferencia con la atmósfera ($K_{laO_2}^{\text{atm}}$) y la aireación forzada (K_{laO_2}). El balance de carbono (5) es análogo, pero el término fotosintético aparece con signo opuesto, reflejando el consumo de CO_2 . En ambos gases, los flujos de intercambio se determinan por los coeficientes volumétricos K_{la} y la desviación respecto al equilibrio de saturación.

2.3. Extremum Seeking Control

El *Extremum Seeking Control* (ESC) es una estrategia de control sin modelo explícito, ampliamente utilizada para la optimización en línea de sistemas dinámicos con incertidumbre estructural o parámetros variables. Su principal objetivo es ajustar una entrada de control para maximizar o minimizar una medida de desempeño del sistema, incluso cuando no se dispone de un modelo matemático preciso (Krstić and Wang, 2000). Esta característica lo convierte en una técnica especialmente atractiva para aplicaciones en bioprocesos, donde las dinámicas suelen ser altamente no lineales y sujetas a variabilidad temporal, tal y como ocurre en el sistema objeto de control en este trabajo.

El principio fundamental del ESC se basa en la aplicación de una señal oscilatoria (denominada *dither*) a la variable de control, lo que induce una modulación en la salida del sistema. Al analizar la respuesta resultante mediante una etapa de demodulación es posible extraer información sobre el gradiente local de la función objetivo respecto a la entrada. Esta información se utiliza para ajustar iterativamente la señal de control hacia el óptimo. El esquema general de esta estrategia, conocido como estructura de modulación-demodulación, se presenta en la Figura 2.

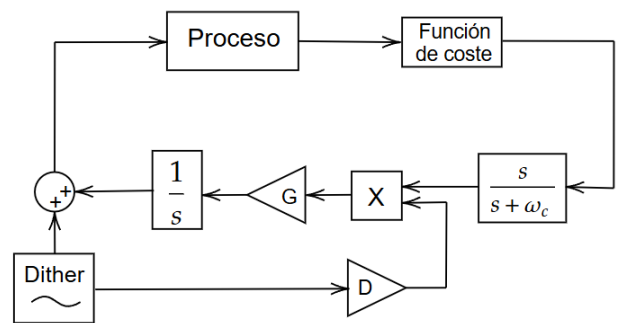


Figura 2: Esquema clásico de ESC

Esta técnica permite adaptar en tiempo real la entrada de control, mostrando gran robustez frente a perturbaciones lentas y modelos desconocidos. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado por la selección inadecuada de parámetros como la amplitud y frecuencia del *dither*, especialmente en sistemas con dinámica lenta o perturbaciones rápidas, como es el caso del reactor bajo estudio.

2.4. Diseño de la estructura de control

La dinámica de los fotobiorreactores *raceway* presenta varios retos dentro de la estrategia de ESC. En primer lugar, el sistema presenta constantes de tiempo variables, lo cual refleja la dinámica no lineal y dependiente del estado del propio proceso biológico. Basándonos en estudios previos (Caparroz et al., 2024), se ha determinado que las constantes de tiempo oscilan en un rango amplio, entre 420 segundos y 1500 segundos, lo que refuerza la necesidad de un diseño adaptativo o robusto para el controlador. Esta variabilidad puede atribuirse a factores operacionales como la concentración de biomasa, la temperatura del medio o la dilución, que modifican la respuesta dinámica del reactor, además de presentar perturbaciones rápidas debidas a cambios en la irradiancia.

Otra característica a tener en cuenta del sistema es la presencia de un tiempo de retardo significativo, aproximadamente de 360 segundos, asociado al tiempo de desplazamiento del fluido desde el punto de inyección de CO_2 (ubicado en el foso) hasta el punto de medición (sensor de concentración), localizado al final del recorrido del canal. Este retardo introduce un desfase entre la acción de control así como en el *dither*, lo cual condiciona el diseño de la estrategia de control.

Conociendo a priori tanto el tiempo de retardo como la variabilidad de las constantes de tiempo, es posible acotar el comportamiento dinámico del sistema dentro de un conjunto de modelos lineales invariantes en el tiempo con retardo.

Una vez establecido el rango dinámico del sistema, determinado tanto por el intervalo de constantes de tiempo [420, 1500] segundos como por el retardo fijo de transporte de aproximadamente 360 segundos, se procedió a la selección y análisis de la señal de excitación periódica (*dither*) necesaria para la implementación del esquema de control basado en modulación-demodulación.

Dado que el sistema es muy lento y se requiere una convergencia rápida que permita controlar el pH durante el periodo diurno, se seleccionó un *dither* de $\omega_d = 0,0035 \text{ rad/s}$ lo cual implica que un periodo completo del mismo tarda aproximadamente 1800 segundos, 5 vueltas del reactor.

Esta elección ubica claramente al *dither* fuera del ancho de banda del sistema, tal como evidencian la magnitud (las líneas rojas) en la Figura 3, que muestran la respuesta en frecuencia del sistema para los extremos del rango de constantes de tiempo consideradas. Al encontrarse en una región frecuencial donde la magnitud del sistema es baja, se garantiza una mínima interacción con la dinámica dominante del proceso, condición necesaria para preservar la validez del principio de separación entre la señal de control y la señal de modulación.

La ubicación del *dither* en esta banda asegura que, al atravesar el sistema, sufre un retardo específico adicional relacionado con la fase inducida por la respuesta en frecuencia. Este retardo es diferente para cada configuración dinámica del sistema (es decir, para cada valor de constante de tiempo dentro del rango plausible), lo que obliga a considerar un retardo total de la señal demodulada como:

$$\Phi_{total}(\omega_d) = \Phi_{transporte}(\omega_d) + \Phi_{sistema}(\omega_d) + \Phi_{HPF}(\omega_d) \quad (6)$$

donde $\Phi_{transporte}(\omega_d)$ representa el desfase del *dither* debido al retardo de transporte del sistema, $\Phi_{sistema}(\omega_d)$ representa el desfase del sistema evaluado a la frecuencia del *dither*, y

$\Phi_{HPF}(\omega_d)$ es el desfase asociado al filtro paso-alto utilizado durante la demodulación. Esta estructura de desfases es clave para la correcta interpretación de la señal demodulada y, en consecuencia, para la sintonización del estimador de gradiente o el algoritmo de ajuste que se emplee posteriormente en el diseño del controlador adaptativo.

Un aspecto crucial en esta propuesta de control ha sido la gestión del retardo total que afecta a la señal de demodulación. Como se ha mencionado, el sistema presenta un retardo de transporte constante de 360 segundos, asociado al tiempo que tarda el fluido en desplazarse desde el punto de inyección de CO_2 hasta el sensor. Este retardo es invariante y no se ve afectado por las dinámicas internas del sistema, lo que permite considerarlo como una componente fija y conocida del retardo total.

En cambio, tanto la dinámica del sistema como el filtro paso-alto introducen desfases variables que dependen de la frecuencia de la señal de *dither* y de sus respectivas características de respuesta en frecuencia. La dinámica del sistema, al tratarse de un proceso de tipo lento, introduce un desfase negativo cuya magnitud aumenta con la constante de tiempo. Por su parte, el filtro paso-alto, al operar cerca de su frecuencia de corte, introduce un desfase positivo que varía con la frecuencia.

La estrategia adoptada consiste en seleccionar la frecuencia de corte del filtro paso-alto de forma que el desfase positivo que este introduce compense, en promedio, el desfase negativo impuesto por la dinámica del sistema. En particular, se busca que la suma total de desfases —sistema más filtro— se encuentre centrada alrededor de cero en el rango de constantes de tiempo del sistema. Esto implica que dicha suma sea positiva para valores bajos del rango, negativa para los altos y que cruce por cero en un punto intermedio.

Este centrado simétrico del desfase permite que, en la frecuencia de operación del *dither* ($\omega_d = 0,0035 \text{ rad/s}$), la contribución combinada del sistema y del filtro tenga un retardo neto cercano a cero. De esta forma, se deja como única componente dominante el retardo de transporte, que es fijo y conocido:

$$\Phi_{total}(\omega_d) = \Phi_{transporte}(\omega_d) + \overbrace{\Phi_{sistema}(\omega_d) + \Phi_{HPF}(\omega_d)}^{\text{Desfase simétrico a 0 en el rango de } \tau} \quad (7)$$

Este enfoque facilita el tratamiento de la señal demodulada, al eliminar la dependencia del desfase respecto a las variaciones dinámicas del sistema. Además, se mejora la precisión en la estimación del gradiente y se preserva la robustez del esquema de control frente a cambios en la dinámica del proceso. En particular, la frecuencia de corte óptima del filtro paso-alto se ha fijado en $\omega_c = 0,0084 \text{ rad/s}$, valor que sitúa la señal de *dither* en un desfase cercano a $\pm 12^\circ$ en el centro del rango dinámico esperado, tal como se muestra en la Figura 3.

Adicionalmente, durante el diseño se ha considerado que el sistema físico presenta una limitación real en el caudal acotado entre 0 y 12 L/min, por lo que es necesario incorporar una estrategia de *anti-windup* que evite la saturación del actuador. En particular, debido a la presencia de una señal de *dither* de amplitud A superpuesta a la referencia de control, la acción de control total no debe sobrepasar bajo ninguna circunstancia los límites físicos del sistema. Por ello, el mecanismo de *anti-windup* acota la referencia de control a $0 + A$ y $12 - A$ L/min.

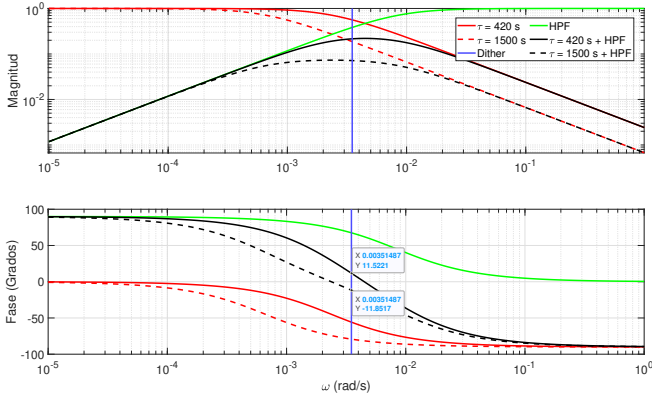


Figura 3: Diagrama de bode de las dinámicas globales del sistema para un filtro paso-alto con $\omega_c = 0,0084$ rad/s

Para lograrlo, se implementa una saturación simétrica sobre la señal de control con un margen igual a la amplitud de la señal de *dither*, de modo que el valor medio de la señal permanezca dentro del rango admisible, incluso considerando las oscilaciones inducidas. Este mecanismo de protección impide que el integrador del controlador acumule error en condiciones de saturación (efecto *windup*), manteniendo así la estabilidad y el rendimiento del sistema de control aun en presencia de restricciones físicas estrictas.

Por último, dado que el comportamiento del proceso presenta una dependencia directa con la radiación solar y con la entrada intermitente de medio de cultivo durante las operaciones de dilución o compensación de evaporación, se han incorporado dos compensadores *feedforward* (FF) estáticos. Esta elección resulta adecuada porque el sistema exhibe un retardo dominante, de modo que una acción *feedforward* dinámica no sería implementable (Guzmán and Hägglund, 2024b). Ambos *feedforward* se han conectado dentro de la misma estructura de *antiwindup*, garantizando que cualquier contribución anticipativa quede también limitada por la saturación simétrica diseñada para el actuador.

Finalmente, el bloque de control incluye una lógica de supervisión que habilita o deshabilita la señal de *dither* según la irradiancia: cuando la radiación cae por debajo de un umbral configurado (condición de noche), el *dither* se desactiva para evitar la inyección innecesaria de CO_2 , la cual podría provocar un descenso excesivo del pH del reactor en ausencia de fotosíntesis, a la vez que se mantiene un reset en el integrador. Siendo el diseño final a simular el que se muestra en la Figura 4.

Como función de coste se emplea una parábola simétrica centrada en la consigna, con valor máximo $\mathcal{J} = 1$ cuando pH es igual al setpoint y se anula a ± 2 unidades del setpoint generando una penalización suave cuando el pH se desvía significativamente del punto de ajuste como se muestra en la ecuación (8):

$$\mathcal{J}(pH) = 1 - \left(\frac{pH - pH_{\text{setpoint}}}{2} \right)^2 \quad (8)$$

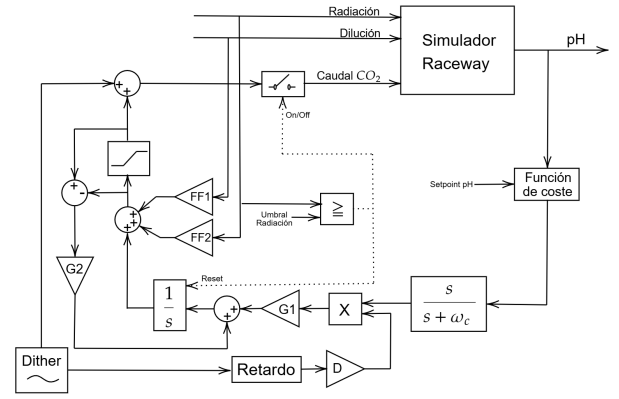


Figura 4: Esquema final implementado en simulación

3. Resultados

En la Figura 5 se recoge la respuesta del sistema a lo largo de tres días de simulación continua. El perfil de radiación y la temperatura ambiente no son sintéticos sino que procede de mediciones reales suministradas por la estación meteorológica del emplazamiento, lo que añade realismo al escenario planteado.

Más allá de la mera comparación entre el regulador convencional (ESC) y su variante con compensación anticipativa (ESC + FF), el objetivo central del estudio es evidenciar que un algoritmo de *Extremum Seeking Control* puede implantarse con éxito en un fotobiorreactor *raceway*, a pesar de ser un proceso caracterizado por constantes de tiempo muy lentas y retardos significativos.

El escenario utilizado en la simulación contempla dos días con condiciones de irradiancia despejadas y un tercero fuertemente nublado, lo que permite evaluar la robustez del control frente a variaciones bruscas de irradiancia. La incorporación de la rama *feedforward* suaviza los picos de caudal de CO_2 durante la dilución y reduce el sobreimpulso en los amaneceres y atardeceres, sin sacrificar estabilidad. En conjunto, los resultados demuestran que el ESC constituye una alternativa práctica para la operación autónoma de fotobiorreactores bajo condiciones ambientales cambiantes, y que su rendimiento puede mejorarse aún más mediante la inyección selectiva de conocimiento sobre las perturbaciones dominantes.

$$IAE \int_{t_0}^{t_f} |pH(t) - pH_{\text{consigna}}| dt \quad (9)$$

Para cuantificar la mejora introducida por la acción anticipativa se calculó el índice IAE (*Integral of Absolute Error*) mediante la ecuación (9), donde t_0 y t_f representan el inicio y el final del experimento. El ESC sin FF arrojó un valor de $IAE_{ESC} = 22448.76$, mientras que la estrategia mixta redujo el error acumulado a $IAE_{ESC+FF} = 19905.69$, lo que representa una disminución relativa del 11.32 %. Estos resultados corroboran que la rama *feedforward* no sólo atenúa los picos debidos a la dilución, como se aprecia en la Figura 5, sino que también mejora el desempeño integral del lazo a lo largo de todo el periodo de operación. Destacar que la combinación de compensadores FF con técnicas de ESC no es típicamente utilizada en la literatura, lo que aporta otra contribución interesante de este trabajo.

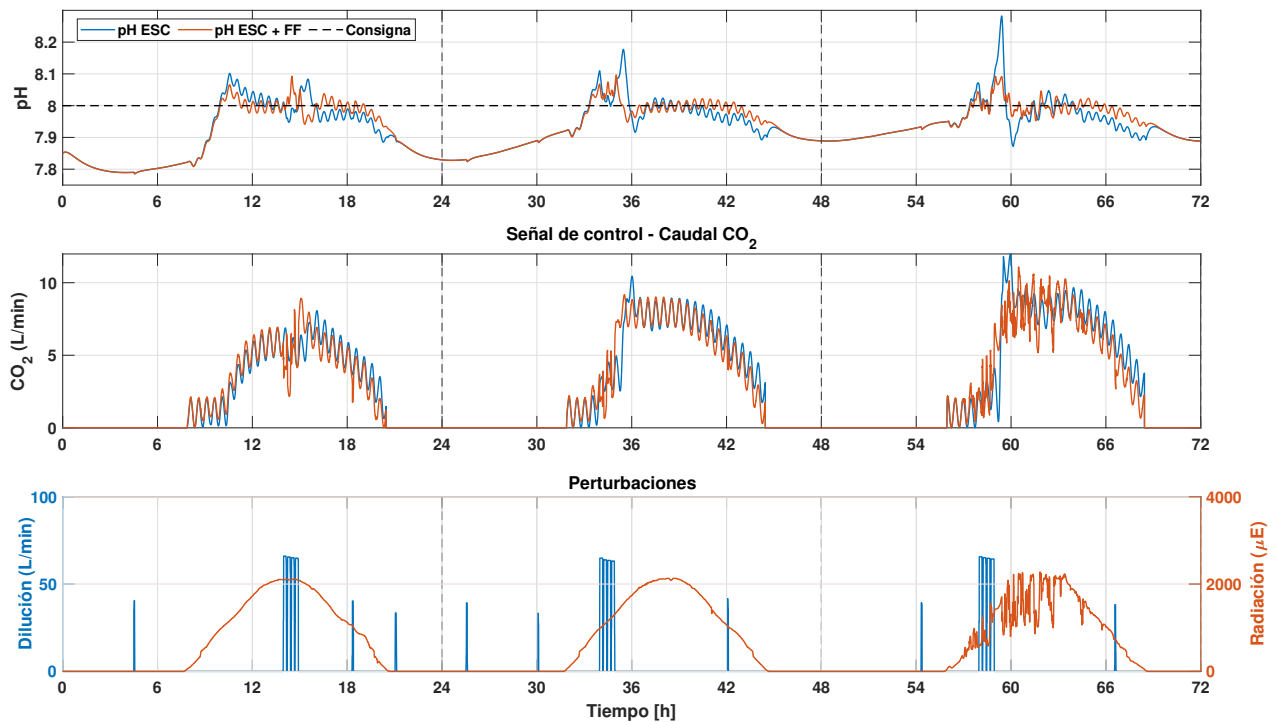


Figura 5: Resultados de simulación del ESC y ESC + FF

4. Conclusiones

El ESC mantiene el pH dentro de un intervalo de $\pm 0,10$ unidades alrededor de la consigna durante los tres días simulados, demostrando su viabilidad práctica. La incorporación de la rama *feedforward* (ESC + FF) alimentada con las perturbaciones reales de radiación y dilución mejora notablemente la calidad del control: reduce los picos de caudal de CO_2 en las transiciones amanecer-atardecer, atenúa el sobreimpulso durante el proceso de dilución y acorta los tiempos de asentamiento sin incrementar el esfuerzo de control. Esta combinación del ESC con *feedforward* demuestra igualmente una solución relevante para este tipo de procesos para su posible aplicación práctica en futuros trabajos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos [números de subvención PID2023-150739OB-I00] financiados por el Ministerio de Ciencia de España y Horizonte Europa - Programa Marco de Investigación e Innovación (2021-2027) [números de subvención 101060991 REALM].

Referencias

Acien, F. G., Fernández, J. M., Magán, J. J., Molina, E., 2012. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances* 30 (6), 1344–1353, special issue on ACB 2011.

Acien, F. G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C., Masojídek, J., 2017. Photobioreactors for the production of microalgae. In: Gonzalez-Fernandez, C., Muñoz, R. (Eds.), *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 1–44.

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

Caparroz, M., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Acien, G., 04 2024. A novel data-driven model for prediction and adaptive control of pH in raceway reactor for microalgae cultivation. *New Biotechnology* 82.

Dewasme, L., Vande Wouwer, A., 2020. Model-free extremum seeking control of bioprocesses: A review with a worked example. *Processes* 8 (10).

Feudjio Letchindjo, C. G., Dewasme, L., Vande Wouwer, A., 2021. An experimental application of extremum seeking control to cultures of the microalgae *scenedesmus obliquus* in a continuous photobioreactor. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 35 (7), 1285–1297.

Gil, J. D., Roca, L., Zaragoza, G., Pérez, M., Berenguel, M., 2022. Improving the performance of solar membrane distillation processes for treating high salinity feeds: A process control approach for cleaner production. *Journal of Cleaner Production* 338, 130446.

González-Hernández, J., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J. L., Acien Fernández, F. G., Visioli, A., 03 2022. Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 19, 164–173.

Guzmán, J. L., Hägglund, T., 2024a. Feedforward Control: Analysis, Design, Tuning rules, and Implementation. *Walter de Gruyter GmbH & Co KG*.

Guzmán, J. L., Hägglund, T., 2024b. Tuning rules for feedforward control from measurable disturbances combined with pid control: a review. *International Journal of Control* 97 (1), 2–15.

Guzmán, J. L., Acien, G., Berenguel, M., 12 2020. Modelado y control de la producción de microalgas en fotobioreactores industriales 18, 1.

Johnson, D. A., Weissman, J., Goebel, R., 1988. An outdoor test facility for the large-scale production of microalgae. *Tech. rep.*, Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA); Microbial Products, Inc.

Krstić, M., Wang, H.-H., 2000. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems. *Automatica* 36 (4), 595–601.

Nordio, R., Delgado, F., Sánchez-Zurano, A., González-Hernández, J., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J. L., Lafarga, T., Acien, G., 11 2022. Long-term assessment of the nutrient recovery capacity and biomass productivity of *scenedesmus almeriensis* in raceway reactors using unprocessed urban wastewater. *Bioresource Technology* 369, 128374.

Sánchez-Zurano, A., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J. L., Acien-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., Molina Grima, E., 2021. Abaco: a new model of microalgae-bacteria consortia for biological treatment of wastewaters. *Applied Sciences* 11 (3), 998.

Tapie, P., Bernard, A., 1988. Microalgae production: Technical and economic evaluations. *Biotechnology and Bioengineering* 32 (7), 873–885.