

Jornadas de Automática

Control híbrido basado en perturbaciones medibles para un fotobiorreactor industrial tipo raceway

Mulero-Martínez, Juan Ignacio^{a,*}, Baños, Alfonso^b, Guzmán, José Luis^c, Moreno, José Carlos^c

^aDpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena, España.

^bDpto. de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones, Universidad de Murcia, 30100 Murcia, España.

^cDpto. de Informática, Universidad de Almería, CIESOL, ceiA3, 04120 Almería, España.

To cite this article: Mulero-Martínez, Juan Ignacio, Baños, Alfonso, Guzmán, José Luis, Moreno, Juan Carlos. 2025. Design and Implementation of a Hybrid Controller for an Industrial Raceway Photobioreactor. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12203>

Resumen

Se presenta el diseño e implementación de un controlador híbrido basado en PI+CI para la regulación del pH en un fotobiorreactor industrial tipo raceway. Se aborda la problemática de la saturación del actuador y la presencia de perturbaciones externas como la radiación solar, proponiéndose estrategias para evitar el fenómeno del windup del integrador y mejorar la robustez del sistema. Los resultados en simulación muestran que el controlador híbrido propuesto supera en rendimiento a un PI clásico con anti-windup, especialmente en condiciones donde la presencia de la perturbación afecta en gran medida al comportamiento del sistema y para referencias de pH elevadas.

Palabras clave: Control de pH, Control Reseteado, PI+CI, Anti-windup, Robustez, Microalgas

Hybrid Controller based on measurable disturbances for an Industrial Raceway Photobioreactor

Abstract

This paper presents the design and implementation of a hybrid PI+CI controller for pH regulation in an industrial raceway photobioreactor. The challenges related to actuator saturation and external disturbances such as solar radiation are addressed, proposing strategies to prevent integrator windup and improve system robustness. Simulation results show that the hybrid controller outperforms a classic PI with anti-windup, especially under high-disturbance conditions and for higher pH setpoints.

Keywords: pH control, Reset control, PI+CI, Anti-windup, Robustness, Microalgae

1. Introducción

La producción de microalgas en fotobiorreactores industriales requiere del uso de estrategias de control avanzadas para garantizar la estabilidad de parámetros críticos, como el pH, ante perturbaciones externas y restricciones físicas del sistema. Estos sistemas se pueden clasificar en dos grandes grupos, los fotobiorreactores cerrados y los fotobiorreactores abiertos. El uso de un tipo de reactor u otro viene motivado fundamentalmente por el tipo de aplicación a la que se destina el cultivo de las microalgas. Cuando se requiere una biomasa de alta calidad se usan los cerrados (tubulares, tipo bolsa,...) y cuando se requiere una producción a gran escala y con un coste míni-

mo, se hace uso de los abiertos (raceway, planos,...), siendo los raceway los más extendidos. En este trabajo se propone el uso de un controlador híbrido PI+CI, que combina la acción integral tradicional con la de un integrador tipo Clegg, permitiendo una mejor gestión de la saturación del actuador y del rechazo de perturbaciones, en este tipo de fotobiorreactores.

2. Descripción de la planta

La planta consiste en un fotobiorreactor industrial tipo raceway de una extensión de 80 m², ubicado en el centro IFAPA de la Junta de Andalucía, junto a la Universidad de Almería

*Autor para correspondencia: juan.mulero@upct.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

(Figura 1). El sistema consta de dos canales paralelos de 40 m de longitud, 1 m de ancho y una profundidad de 0,3 metros. La mezcla del cultivo y su circulación a lo largo del canal se logra mediante una rueda de palas de 1,2 metros de diámetro, equipada con ocho palas. Inmediatamente después de estas se encuentra un foso, donde se realiza la inyección de dióxido de carbono (CO_2) y aire, destinados al control del pH y del oxígeno disuelto, respectivamente.



Figura 1: Raceway 80 m² IFAPA UAL

El control del pH en este tipo de sistemas es fundamental para garantizar un desarrollo óptimo de las microalgas, para ser utilizadas en distintas aplicaciones, como la depuración de agua con el fin de mejorar la sostenibilidad de otros procesos, como por ejemplo la agricultura bajo invernadero, o para la generación de biomasa, que supone también una contribución importante a la sostenibilidad del planeta, pudiendo ser empleada como biocombustible o como alimento para animales, contribuyendo al mismo tiempo a la reducción de emisiones de CO_2 a la atmósfera. Sin embargo, esta tarea de control representa un desafío debido a su naturaleza no lineal. Este sistema se suele operar entorno a un pH concreto, pudiendo aproximarse el sistema por un modelo lineal simplificado alrededor de ese punto de operación, y abordar el problema de control como un problema de regulación. La principal entrada manipulable que afecta al pH del sistema es la inyección de CO_2 (Berenguel et al., 2004). En este trabajo se usa el modelo simplificado propuesto en (Caparroz et al., 2023), y mostrado en la ecuación 7.

3. Controlador Híbrido

El objetivo de este trabajo es diseñar un controlador capaz de mantener un nivel de pH deseado y rechazar perturbaciones externas. El nivel de pH de la cultura de microalgas depende de la apertura de la válvula de gas CO_2 (entrada del sistema) y de la radiación solar (perturbación), como se explicó en la sección anterior Pawlowski et al. (2014). La apertura de la válvula está limitada al intervalo $[0, 1]$, lo que implica que el sistema es no lineal con una saturación en la entrada de control. El controlador propuesto para el fotobiorreactor es un controlador reseteado que combina ponderadamente un controlador proporcional-integral con un integrador de Clegg (PI+CI), inspirado en Baños and Barreiro (2012). El CI actúa como un integrador lineal cuando la señal de error es distinta de cero, y reinicia su estado a cero cuando la señal de error cruza el cero.

Dado que el controlador reseteado se describe utilizando el marco de sistemas dinámicos híbridos de Goebel et al. (2012), a continuación se proporciona una breve introducción. Después, se presentan los controladores CI y PI+CI, junto con consideraciones particulares de diseño sobre la ley de reset para el control de pH en el fotobiorreactor tipo raceway.

3.1. Antecedentes: Sistemas Dinámicos Híbridos

Un sistema híbrido (para más detalles Goebel et al. (2012) para un tratamiento en profundidad y detalles técnicos, y también Cai and Teel (2009) donde se analizan explícitamente sistemas híbridos con entradas), con estado continuo $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ y entrada $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^m$, se define como:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \mathbf{w}), & (\mathbf{x}, \mathbf{w}) \in C \\ \mathbf{x}^+ = G(\mathbf{x}, \mathbf{w}) & (\mathbf{x}, \mathbf{w}) \in D \end{cases} \quad (1)$$

y mediante los siguientes elementos: el *conjunto de flujo* $C \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, la *función de flujo* $F : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$, el *conjunto de salto* $D \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, y la *función de salto* $G : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$. El sistema híbrido se denota por $\mathcal{H} = (C, F, D, G)$.

Las *señales híbridas* ϕ se definen como funciones en un *dominio de tiempo híbrido* $\text{dom } \phi$, que es la unión de intervalos $[t_j, t_{j+1}] \times j$ con $0 = t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots$. Un *arco híbrido* $\mathbf{x} : \text{dom } \mathbf{x} \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una señal híbrida en la que $\mathbf{x}(\cdot, j)$ es localmente absolutamente continua para cada j . Una entrada híbrida $\mathbf{w} : \text{dom } \mathbf{w} \rightarrow \mathbb{R}^m$ es una señal híbrida en la que $\mathbf{w}(\cdot, j)$ es medible de Lebesgue y localmente esencialmente acotada para cada j . Una *solución* de (1) se define como un par (\mathbf{x}, \mathbf{w}) , consistente en un arco híbrido y una entrada híbrida con $\text{dom } \mathbf{x} = \text{dom } \mathbf{w}$, que satisface las dinámicas de flujo y salto del sistema híbrido.

3.2. El Integrador de Clegg

Para el integrador de Clegg, se sigue el modelo desarrollado en Baños and Barreiro (2022) para el caso de dos entradas. Se trata de un sistema híbrido como (1) con estado $\mathbf{x} = (x, q)$, un estado continuo $x \in \mathbb{R}$ y un estado discreto $q \in \{-1, 1\}$, y con una entrada $\mathbf{w} = (e, \sigma)$, con $e, \sigma \in \mathbb{R}$.

El estado x evoluciona integrando la entrada e (típicamente la señal de error en un sistema de control en lazo cerrado), y es también la salida del controlador. El estado discreto q , junto con la entrada σ , se utilizan para definir la ley de reseteo. Nótese que q se usa para detectar el cruce por cero de σ (Baños and Barreiro (2022) para más detalles técnicos). Se define como:

$$CI : \begin{cases} \dot{x} = e & , (x, q, \sigma) \in C \\ \begin{pmatrix} x^+ \\ q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -q \end{pmatrix} & , (x, q, \sigma) \in D \end{cases} \quad (2)$$

donde los conjuntos de flujo y salto se definen por

$$C = \{(x, q, \sigma) \in \mathbb{R}^3 : q\sigma \leq 0\} \quad (3)$$

y

$$D = \{(x, q, \sigma) \in \mathbb{R}^3 : q\sigma \geq 0\} \quad (4)$$

respectivamente.

La dinámica del CI se describe por las dos ecuaciones en (2): una para el modo de flujo, donde q es constante y su ecuación se omite, y otra para el modo de salto, donde el estado continuo x se reinicia a cero y el estado discreto q cambia de signo. El diseño del CI depende en gran medida de cómo se determinan sus entradas. Una elección simple, en un problema de control en lazo cerrado, es fijar tanto e como σ como la señal de error.

3.3. El controlador PI+CI

El controlador PI+CI es un controlador híbrido que resulta de la combinación de un PI y un CI. Tiene dos estados continuos $x_I, x_{CI} \in \mathbb{R}$, que evolucionan integrando la entrada e . Además, posee un estado discreto $q \in \{1, -1\}$ que, junto con la entrada σ , define la ley de reseteo según (4). Se define como:

$$PI + CI : \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x}_{CI} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} e, & (x_I, x_{CI}, q, \sigma) \in C \\ \begin{pmatrix} x_I^+ \\ x_{CI}^+ \\ q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_I \\ 0 \\ -q \end{pmatrix}, & (x_I, x_{CI}, q, \sigma) \in D \end{cases}$$

donde C y D se definen de manera similar a (3)-(4). Y su salida se calcula como:

$$u = K_p e + \frac{K_p}{\tau_I} ((1 - p_r) x_I + p_r x_{CI}). \quad (5)$$

El controlador reseteado tiene tres parámetros de diseño: K_p , τ_I y p_r . K_p y τ_I son la ganancia proporcional y el tiempo integral, respectivamente, y p_r es el coeficiente de reinicio. Nótese que durante el flujo, antes del primer salto, y por tanto $x_I = x_{CI}$, la salida u es exactamente la de un controlador PI, al que se denominará controlador base PI. Al saltar, el parámetro p_r ajusta el peso de x_I y x_{CI} en la salida del PI+CI.

4. Un controlador híbrido para el control de pH

Se propone un controlador híbrido para el control de pH del fotobiorreactor tipo raceway descrito en la Sección 2. Este controlador es una mejora del PI+CI de la Sección 3 y se diseña específicamente teniendo en cuenta ciertas características de la planta.

En primer lugar, se definen las dos entradas e y σ del controlador híbrido. Aquí, la entrada e se define como la diferencia entre el valor de pH deseado y el pH medido. Una elección adecuada de la entrada σ para el control de pH, dado que existe un retardo de transporte θ , es hacer $\sigma = e + \theta \dot{e}$ (Vidal and Baños (2010), Sáez et al. (2022)). Esto permite al controlador anticipar un salto en el instante t usando el valor predicho de e en $t + \theta$. Además, se discuten a continuación algunas mejoras de diseño específicamente relacionadas con el problema de control de pH en este tipo de sistemas.

4.1. La dinámica del pH y la saturación de la entrada e

El flujo de CO_2 inyectado al fotobiorreactor es controlado por la salida del controlador reseteado. Dado que no existe un mecanismo para extraer CO_2 del biorreactor, la entrada de control está inherentemente restringida a valores no negativos,

lo que implica una saturación implícita en cero. Esto significa que el pH solo puede reducirse activamente mediante la inyección de CO_2 , mientras que el aumento del pH depende completamente de perturbaciones externas como la radiación solar. Cuando el pH cae por debajo del punto de consigna (pH_d), la señal de error $e = pH_d - pH$ se vuelve positiva, haciendo que los integradores del controlador (tanto el PI estándar como el integrador de Clegg, CI) acumulen valores positivos elevados. Esto resulta en una acción de control excesiva (es decir, una inyección de CO_2 desmesurada) una vez que el pH cruza pH_d (como consecuencia de la radiación solar y la fotosíntesis), que tarda en recuperar su valor de inyección de CO_2 positiva, provocando un sobreimpulso y oscilaciones significativas.

Para mitigar este fenómeno conocido como windup del integrador, una estrategia práctica es evitar la acumulación del integrador mientras el error permanezca no negativo. Esto se logra definiendo una señal de error efectiva e^* mediante la siguiente regla de saturación:

$$e^* = \begin{cases} 0 & \text{si } e \geq 0 \text{ (pH} \leq pH_d\text{)}, \\ e & \text{si } e < 0 \text{ (pH} > pH_d\text{)}, \end{cases} \quad (6)$$

lo que efectivamente desactiva la acción integral hasta que el pH supere el punto de consigna. Si bien este enfoque aborda directamente el problema del windup anulando la señal de error durante condiciones de sobreoscilación, pueden emplearse técnicas anti-windup alternativas —como back-calculation o clamping— para limitar dinámicamente los estados del integrador sin saturar explícitamente e . Estos métodos ofrecen flexibilidad adicional para equilibrar la agresividad del control y el rechazo de perturbaciones, especialmente bajo condiciones de irradiancia variable.

4.2. Diseño del controlador base PI: K_p y τ_I

Se necesita el modelo lineal simplificado del sistema alrededor del punto de operación para el ajuste del controlador base PI del PI+CI. El modelo considera la estructura del reactor tipo raceway, la ubicación de sensores y actuadores, y la dinámica de los datos. Basado en (Caparroz et al., 2023), el modelo lineal que conecta el pH de la cultura (variable y) y la apertura de la válvula de CO_2 (variable u) se da por la siguiente función de transferencia de primer orden con retardo:

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-hs} U(s), \quad (7)$$

donde k es la ganancia DC del proceso, τ es la constante de tiempo y h es el retardo. El retardo se debe principalmente a la distancia entre el punto de inyección de CO_2 y el punto de medición del pH.

4.3. Ajuste de parámetros y ratio de reset

La señal de radiación puede modelarse como una distribución gaussiana en la que el máximo de radiación ocurre en $t = t_c$ con intensidad A , y la mayor parte de la energía se encuentra en el intervalo $[t_1 = t_c - \Delta, t_2 = t_c + \Delta]$. Es importante evitar que los integradores se sobrecarguen fuera de este intervalo, especialmente para $t \geq t_2$. En estos casos, un valor muy reducido del integrador de Clegg es suficiente para mantener la acción de control en niveles mínimos.

Para conseguir este objetivo, se propone modificar el ratio de reseteo del integrador en función de la intensidad de la radiación, de manera que $p_r(t)$ dependa directamente de la señal de irradiancia. En particular, se emplea la siguiente ley de modulación adaptada a la radiación medida:

$$p_r(t) = \begin{cases} 1 - \frac{I(t)}{I_m}, & \text{si } t \in [T_{\min}, T_{\max}], \\ 0, & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (8)$$

donde $[T_{\min}, T_{\max}]$ representa el soporte de la radiación, $I(t)$ es la radiación medida en el instante t e I_m es el valor medio de irradiancia en el intervalo de interés. Así, el porcentaje de reset se ajusta dinámicamente según el perfil real de radiación.

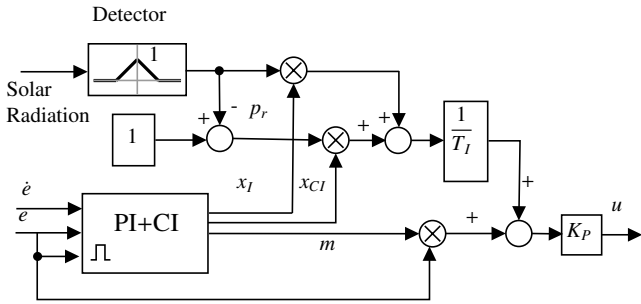


Figura 2: Detalle del controlador reseteado: esquema PI+CI con porcentaje de reseteo adaptado a la intensidad de radiación.

La Figura 2 muestra el detalle del controlador PI + CI, donde el porcentaje de reseteo se determina directamente a partir de la irradiancia solar. El instante inicial y final del intervalo relevante de radiación se ajustan en función del perfil diario, permitiendo al esquema de control implementar la ecuación (8).

5. Resultados de simulación

El esquema de control propuesto se evaluó mediante el simulador desarrollado en (Otálora et al., 2021), comparando su desempeño con el de un controlador PI lineal con anti-windup basado en back-calculation, para una referencia de pH de 7.9 bajo condiciones soleadas típicas de abril (Figura 3(a)). El PI se sintonizó utilizando el método Skögestad Internal Model Control (SIMC), como se describe en Vilanova and Visioli (2012), y se reajustó heurísticamente para la planta no lineal. El controlador PI lineal empleó el mismo modelo lineal de planta que el PI base del controlador PI+CI, dado por la ecuación (7). Se estimó que los parámetros del modelo varían en los rangos $k \in [-0,2, -0,075]$, $\tau \in [50, 2200]$ segundos y el retardo se fijó en $h = 300$ segundos. Para el controlador PI lineal se utilizaron los siguientes valores: $K_p = -2$, $T_i = 4500$ y $K_b = -\frac{1}{T_{aw}} = -0,1$. La compensación anti-windup se implementó utilizando el método de back-calculation. Bajo las mismas condiciones de operación, el controlador PI+CI se sintonizó con los mismos parámetros del PI base lineal y $\theta = 300$ s (igualando el retardo h). El ratio de reset $p_r(t)$ sigue la expresión en (8).

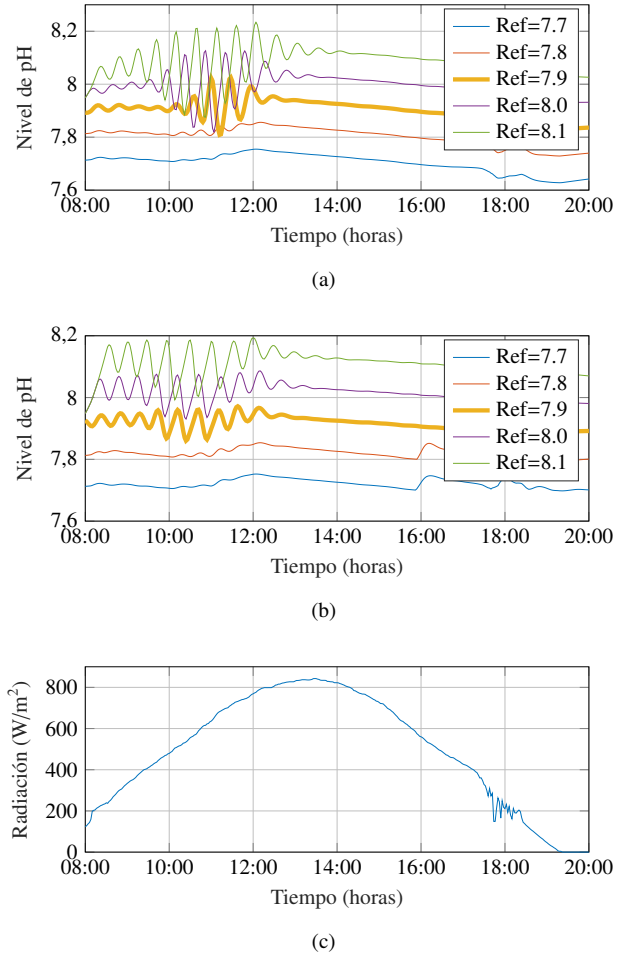


Figura 3: Comparación de desempeño para referencias de pH entre 7.7 y 8.1 (día soleado de abril): (a) PI-AW; (b) PI+CI; (c) Radiación.

La referencia de pH se varió entre 7.7 y 8.1 para evaluar la robustez. Como se observa en las Figuras 3(a)–(b), el PI+CI superó consistentemente al PI-AW. Desde la perspectiva de la teoría de control, se identifican varias diferencias clave entre ambos enfoques. Primero, en cuanto a la respuesta transitoria, el PI con anti-windup presenta oscilaciones iniciales significativas para algunos valores de referencia, lo que indica que el controlador está entrando en saturación; aunque el mecanismo anti-windup ayuda a reducir el windup del integrador, no elimina completamente su efecto. Por el contrario, el PI con integrador de Clegg muestra un sobreimpulso y oscilaciones mucho menores, lo que sugiere un mejor desempeño transitorio.

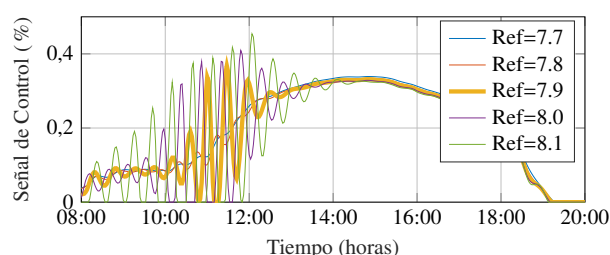
En términos de estabilidad, el integrador de Clegg proporciona una respuesta más amortiguada, con tiempos de establecimiento más rápidos y menor oscilación sostenida. Esto es consistente con la teoría de control no lineal, ya que el integrador de Clegg introduce una acción de reset que evita la acumulación excesiva del término integral y contribuye a mejorar la estabilidad.

Al analizar el seguimiento de referencia, ambos controladores logran alcanzar el valor deseado, aunque el PI+CI lo logra de manera más rápida y suave, especialmente para valores altos de referencia. Esta mejora se atribuye a la acción de reset, que mitiga el sobreimpulso sin perder la acción integral

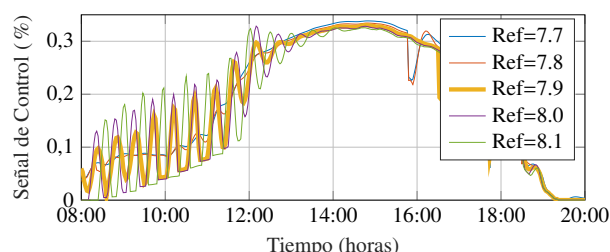
para eliminar el error en régimen permanente.

Finalmente, en cuanto al rechazo de perturbaciones, la radiación solar mostrada en la Figura 3(c) representa una entrada externa significativa. El PI con anti-windup muestra mayor sensibilidad a estas perturbaciones, reflejada en fluctuaciones en el nivel de pH que siguen el perfil de radiación. En cambio, el PI+CI muestra una mayor robustez, manteniendo una respuesta más estable incluso durante los picos de radiación.

En conjunto, el controlador PI con integrador de Clegg supera al PI tradicional con anti-windup en respuesta transitoria, rechazo de perturbaciones y estabilidad global del sistema. Estos resultados ponen de manifiesto las ventajas de incorporar elementos no lineales en el diseño del control, como los integradores reseteados, en sistemas sujetos a saturación y perturbaciones externas.



(a)



(b)

Figura 4: Comparación de la señal de control para referencias de pH entre 7.7 y 8.1 (día soleado de abril): (a) PI-AW; (b) PI+CI.

El desempeño de ambas estrategias de control—PI con anti-windup y PI con integrador de Clegg—puede analizarse en términos de esfuerzo de control, estabilidad y rechazo de perturbaciones. Las Figuras 4(a) y 4(b) muestran las señales de control de ambos enfoques, lo que permite una comparación detallada de su comportamiento dinámico.

Para el PI con anti-windup, la señal de control presenta oscilaciones significativas, especialmente en la fase inicial de operación (antes del mediodía), lo que sugiere una reacción agresiva ante cambios en la referencia y perturbaciones externas, llevando a un mayor esfuerzo del actuador. Aunque el mecanismo anti-windup ayuda a mitigar la saturación, no la elimina completamente, como evidencian las oscilaciones persistentes. En contraste, el PI con integrador de Clegg muestra una señal de control más suave y con menos oscilaciones. Esta respuesta mejorada se atribuye al mecanismo de reset, que evita la acumulación excesiva de la acción integral y reduce el impacto del windup.

Otro aspecto clave es la estabilidad. El PI con anti-windup muestra una señal de control más errática en la fase inicial,

lo que puede indicar menor robustez frente a perturbaciones externas como las variaciones de radiación solar. En cambio, el PI+CI proporciona un esfuerzo de control más uniforme, resultando en una respuesta global más estable. Este comportamiento es coherente con la teoría de control no lineal, donde las estrategias basadas en reset pueden mejorar la estabilidad al modificar dinámicamente el comportamiento del integrador.

El efecto de las perturbaciones externas también se evidencia en el esfuerzo de control. El perfil de radiación solar, mostrado en la Figura 3(c), representa una perturbación importante. En el caso del PI-AW, la señal de control varía significativamente en torno al mediodía, coincidiendo con los picos de radiación, lo que sugiere una mayor sensibilidad a estas perturbaciones. Por el contrario, el PI+CI mantiene una respuesta de control más estable, indicando un mejor rechazo de perturbaciones. Esta menor sensibilidad ayuda a mantener el desempeño del sistema ante fluctuaciones en las condiciones externas.

Ambos esquemas logran un adecuado seguimiento del pH de referencia, pero sus respuestas ante distintos valores de consigna difieren. En el PI-AW, las señales de control para diferentes referencias son más dispares, indicando mayor sensibilidad a los cambios de referencia. En el PI+CI, las respuestas resultan más consistentes entre referencias, lo que sugiere que el integrador de Clegg consigue un desempeño más homogéneo y adaptable.

Tabla 1: Índice ITAE para referencias de pH 7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1

Fecha	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1
25-Marzo	49.39	45.93	32.21	21.49	15.74
8-Abril	50.81	48.10	34.38	22.85	17.76
17-Abril	48.87	45.96	34.20	23.51	18.11
18-Abril	43.23	41.98	34.26	25.68	21.75
19-Abril	44.12	43.05	34.78	26.02	22.07
18-October	51.99	49.79	39.53	32.08	24.57

Tabla 2: Índice IAE para referencias de pH 7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1

Fecha	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1
25-Marzo	54.45	57.48	26.19	13.88	9.24
8-Abril	52.99	57.50	24.23	12.52	8.75
17-Abril	54.48	56.84	25.85	13.71	9.42
18-Abril	51.05	53.54	28.74	16.53	12.15
19-Abril	51.83	54.65	28.96	16.56	12.19
18-October	60.43	62.54	32.45	20.06	13.69

Tabla 3: Índice ISE para referencias de pH 7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1

Fecha	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1
25-Marzo	44.67	41.44	15.89	4.63	2.07
8-Abril	42.67	42.78	13.79	3.48	1.73
17-Abril	43.40	40.80	15.44	4.24	1.99
18-Abril	34.03	32.20	16.65	5.90	3.02
19-Abril	35.77	34.68	17.41	6.03	3.15
18-October	52.55	53.41	26.72	9.70	4.31

El desempeño del controlador reset se evalúa usando tres índices basados en el error: ITAE (Error Integral Absoluto

Ponderado en el Tiempo), IAE (Error Integral Absoluto) e ISE (Error Integral del Cuadrado). Los valores presentados en las Tablas 1, 2 y 3 aparecen como porcentajes respecto al PI con anti-windup, que se toma como 100 %. Un valor inferior al 100 % indica que el controlador reset consigue mejor desempeño al reducir el respectivo índice de error.

El índice ITAE (Tabla 1) enfatiza los errores de larga duración y es un buen indicador de la calidad de la respuesta transitoria. Los resultados muestran que el controlador PI+CI es claramente superior al PI+AW, ya que en todas las fechas y referencias, los valores de ITAE para PI+CI representan un porcentaje significativamente menor respecto al PI+AW (tomado como 100 %). Por ejemplo, el 25 de marzo, el ITAE del PI+CI supone solo el 49.39 % del valor obtenido con PI+AW para pH = 7.7, y disminuye hasta el 15.74 % para pH = 8.1. Los menores porcentajes se alcanzan precisamente para referencias de pH elevadas, como el 21.49 % y 15.74 % para pH = 8.0 y 8.1 respectivamente, evidenciando una mejora muy relevante en la respuesta transitoria. Incluso en las condiciones menos favorables, como el 18 de octubre, el PI+CI mantiene porcentajes claramente inferiores al 55 % para todas las consignas. En resumen, el análisis del ITAE confirma que la estrategia PI+CI proporciona una respuesta transitoria mucho más eficiente y robusta que la obtenida con PI+AW en todos los casos analizados.

El IAE (Tabla 2) mide el error absoluto total, sin ponderar en el tiempo. Los resultados muestran que el controlador PI+CI es claramente superior al PI+AW, ya que en todas las fechas y referencias los valores de IAE para PI+CI representan un porcentaje considerablemente menor respecto al PI+AW (tomado como 100 %). Por ejemplo, el 25 de marzo, el IAE del PI+CI supone el 54.45 % del valor obtenido con PI+AW para pH = 7.7, y disminuye hasta el 9.24 % para pH = 8.1. Esta tendencia descendente se mantiene en el resto de las fechas, donde los menores porcentajes se alcanzan para referencias de pH más elevadas. Incluso en las condiciones menos favorables, como el 18 de octubre, el PI+CI mantiene porcentajes de IAE inferiores al 33 % para pH = 7.9 y desciende hasta el 13.69 % para pH = 8.1. En resumen, el análisis del IAE confirma que la estrategia PI+CI proporciona un control notablemente más eficiente y robusto que el PI+AW, logrando una reducción significativa del error absoluto total en todos los casos analizados.

El ISE (Tabla 3) es especialmente sensible a grandes desviaciones, por lo que resulta relevante para evaluar picos de error y estabilidad. Los resultados muestran que el controlador PI+CI es claramente superior al PI+AW, ya que en todas las fechas y referencias los valores de ISE para PI+CI representan un porcentaje notablemente menor respecto al PI+AW (tomado como 100 %). Por ejemplo, el 25 de marzo, el ISE del PI+CI supone el 44.67 % del PI+AW para pH = 7.7, y disminuye hasta el 2.07 % para pH = 8.1. Los menores porcentajes se alcanzan para referencias de pH elevadas, como el 4.63 % y 2.07 % en pH = 8.0 y 8.1 respectivamente ese mismo día. Esta tendencia se mantiene en todas las fechas, con valores gene-

ralmente por debajo del 5 % para pH = 8.1 y por debajo del 10 % para pH = 8.0, incluso en los días menos favorables como el 18 de octubre, donde el ISE es del 4.31 % para pH = 8.1. En definitiva, estos resultados indican que el controlador reset es especialmente eficaz eliminando grandes desviaciones para consignas elevadas, y refuerzan la tendencia observada en los índices ITAE e IAE, confirmando una notable mejora en la estabilidad y el comportamiento del sistema.

Estos resultados indican que el controlador reset ofrece mejoras sustanciales frente al PI con anti-windup en todas las condiciones, siendo su eficacia especialmente destacada para referencias de pH elevadas.

6. Conclusiones

Se ha demostrado que el uso de un controlador híbrido PI+CI mejora la regulación de pH en un fotobiorreactor industrial ante saturación y perturbaciones, superando en desempeño al PI clásico con anti-windup, especialmente en condiciones exigentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España bajo los proyectos PID2020-112709RB y PID2023-149066NB-I00.

Referencias

- 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.
- Berenguel, M., Rodríguez, F., Ación, F. G., García, J., 2004. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control* 14 (4), 377–387.
- Cai, C., Teel, A. R., 2009. Characterizations of input-to-state stability for hybrid systems. *Systems and Control Letters* 58, 47–53.
- Caparroz, M., Otálora, P., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., mar. 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* 20 (4), 379–388.
- Goebel, R., Sanfelice, R. G., Teel, A. R., 2012. *Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability, and Robustness*. Princeton University Press.
- Otálora, P., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., 2021. Dynamic model for the pH in a raceway reactor using deep learning techniques. In: Gonçalves, J. A., Braz-César, M., Coelho, J. P. (Eds.), *CONTROL 2020*. Springer International Publishing, Cham, pp. 190–199.
- Pawlowski, A., Mendoza, J., Guzmán, J., Berenguel, M., Ación, F., Dormido, S., 2014. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *Bioresource Technology* 170, 1–9.
- Sáez, J. F., Baños, A., Arenas, A., 2022. Reset-and-hold control of systems with time delay. *IEEE Access* 10, 101803–101813. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3208703
- Vidal, A., Baños, A., 2010. Reset compensation for temperature control: experimental application on heat exchangers. *Chemical Engineering Journal* 159, 170–181.
- Vilanova, R., Visioli, A., 2012. *PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches*. Advances in Industrial Control. Springer London.