

Jornadas de Automática

Un nuevo enfoque a la auto-sintonía de controladores PID

Caparroz, Malena^{a,*}, Soltesz, Kristian^b, Hägglund, Tore^b, Guzmán, José Luis^a, Berenguel, Manuel^a

^aDepartamento de Informática, Universidad de Almería, CIESOL, ceiA3, Ctra. Sacramento s/n, Almería, 04120, España.

^bDepartamento de Control Automático, Universidad de Lund, Box 118, Lund, SE-221 00, Suecia.

To cite this article: Caparroz, M., Soltesz, K., Hägglund, T., Guzmán, J.L., Berenguel, M. 2025. A new approach to auto-tuning PID controllers. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12077>

Resumen

Este trabajo presenta un nuevo enfoque a la estrategia de autoajuste para controlar el pH en reactores *raceway*, partiendo de los principios de autoajuste clásicos basados en relés. Se propone un método de relé aplicado a la referencia que permite una integración perfecta en los lazos de control existentes sin necesidad de recalibración manual a lo largo de las estaciones del año o de intervención del operario. Se identificaron dos modelos diferentes: de primer orden con retardo, y de integrador con retardo, y se introdujo un algoritmo de clasificación para evaluar las perturbaciones en la radiación solar, mejorando la fiabilidad del autoajuste en la presencia de nubes. El esquema de control está constituido por un controlador Proporcional-Integral (PI) con *antiwindup* y compensación por adelanto estática para contrarrestar el efecto de la radiación, con todos sus parámetros ajustados automáticamente. Se ha comprobado mediante simulación que el algoritmo de adaptación permite una mejora de la regulación del pH comparado con un esquema de parámetros fijos. Además, la implementación en el sistema real prueba que puede ser fácilmente trasladado a un reactor real sin necesidad de realizar cambios en los parámetros del mismo.

Palabras clave: Control adaptativo, Autotuner, Identificación para control, Diseño de entrada y excitación, Identificación en bucle cerrado

A new approach to autotuning PID controllers

Abstract

This work presents a new approach to the autotuning strategy for controlling pH in *raceway* reactors, based on classical relay-based autotuning principles. A relay applied to reference method is proposed that allows seamless integration into existing control loops without the need for manual recalibration across seasons or operator intervention. Two different models were identified: first-order with time delay and integrator with time delay, and a classification algorithm was introduced to evaluate disturbances in solar radiation, improving the reliability of autotuning in the presence of clouds. The control scheme consists of a Proportional-Integral (PI) controller with *antiwindup* and static feedforward compensator to counteract the radiation effect, with all its parameters automatically adjusted. It has been shown by simulation that the adaptive algorithm allows an improvement in pH regulation compared to a fixed-parameter scheme. Furthermore, the implementation in the real system proves that it can be easily transferred to a real reactor without the need for changes in the algorithm parameters.

Keywords: Adaptive control, Autotuner, Identification for control, Input and excitation design, Closed loop identification

1. Introducción

En las últimas décadas, las microalgas han ganado importancia por su potencial para abordar desafíos relacionados

con el cambio climático, con aplicaciones en alimentación, energía, tratamiento de aguas residuales y fijación de dióxido de carbono. Además de constituir una solución sostenible al cambio climático y al calentamiento global, presentan otras

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

ventajas tales como no competir por tierra cultivable, crecer en diversos medios acuosos, generar grandes cantidades de oxígeno y capturar CO₂ del ambiente (Razzak et al., 2024).

Sin embargo, el cultivo a gran escala presenta desafíos de control significativos. La producción eficiente requiere la regulación precisa de variables claves para el crecimiento de los microorganismos tales como el pH, oxígeno disuelto (OD), la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. Entre todas estas, el pH es particularmente crítico, ya que determina la solubilidad y disponibilidad de CO₂ y nutrientes, teniendo un impacto muy significativo en el metabolismo de las microalgas. En estos sistemas, el pH se ve afectado principalmente por la inyección de dióxido de carbono, el cual provoca su disminución, y la radiación solar, que permite su aumento gracias a que favorece la actividad fotosintética (Yu et al., 2024).

La dinámica de dicha variable es compleja y está sujeta a variaciones significativas debido a ciclos diarios, cambios estacionales y fluctuaciones en las condiciones del cultivo. Esta naturaleza variable en el tiempo dificulta el desarrollo de controladores capaces de mantener condiciones óptimas a lo largo de todo el año y bajo distintas condiciones del cultivo. Recientemente, se ha abierto una línea de investigación relacionada con el modelado y control adaptativo de pH en la producción de microalgas a escala industrial. En Caparroz et al. (2024), se ha desarrollado un modelo adaptativo basado en árboles de regresión que es capaz de adaptar los parámetros de un modelo sencillo en función de las condiciones a las que se encuentra sometido el cultivo. Una vez entrenado dicho modelo, se ha implementado un controlador Proporcional-Integral (PI) que, cada cierto tiempo, adapta sus parámetros en función del modelo estimado por los árboles de regresión.

Por otro lado, en Caparroz et al. (2025) se ha desarrollado una estructura de control híbrida que combina el control adaptativo por modelo de referencia (MRAC) con un controlador PI para el control del pH. En función del error entre la medida de pH y la consigna (establecida en 8, por ser el valor óptimo para maximizar el crecimiento de los microorganismos), se realiza una adaptación a la referencia que es luego enviada al sistema en bucle cerrado, que contiene el controlador PI clásico. Gracias a la adaptación de la referencia, se obtiene una mejor regulación del pH comparada con aquella obtenida con un PI, sin necesidad de obtener nuevos modelos y ajustar los parámetros del controlador. Por último, en (Pataro et al., 2023) se propone e implementa un controlador predictivo basado en el aprendizaje (LBMPC) para el control del pH, utilizando una función que estima la dinámica no modelada y las incertidumbres del modelo basándose en la diferencia entre un modelo de orden reducido y el sistema real.

Con el fin de seguir contribuyendo en esta línea de control adaptativo, en este trabajo se retoma una técnica de control adaptativo que surgió a finales del siglo XX, pero cuyo estudio en los últimos años ha sido poco abordado: los algoritmos de ajuste de parámetros automáticos. Los métodos tradicionales de sintonización a menudo requieren ajustes manuales o experimentos fuera de línea. La metodología del “*autotuner*” basado en relé, introducida en Åström and Hägglund (1984), es una técnica que implica introducir realimentación de relé en el bucle de control para inducir oscilaciones. Analizando dichas oscilaciones, el *autotuner* estima parámetros clave de la dinámica del sistema para ajustar los parámetros de un con-

trolador. La prueba de *autotuning* se realiza en bucle cerrado, manteniendo el proceso cerca del punto de consigna para trabajar en un rango lineal de interés, siendo una técnica efectiva para procesos altamente no lineales. Típicamente la metodología de autoajuste aplica la señal de excitación en la señal de control. En este trabajo se presenta un nuevo enfoque donde dicha excitación es aplicada en la referencia del lazo de control, lo cual permite establecer una metodología adaptativa independiente de las estaciones del año o de las condiciones del proceso. Esta nueva idea se evalúa para el control de pH en reactores *raceway*, primero en simulación y, posteriormente, en un fotobiorreactor de escala semi industrial.

2. Problema de control

La técnica de control propuesta ha sido implementada sobre un reactor de tipo *raceway*, cuyo esquema puede observarse en la Figura 1. El reactor consta de dos canales de 1 metro de ancho y 40 metros de largo por el cual las microalgas circulan realizando la fotosíntesis. Una rueda de palas colocada al inicio del canal permite el mezclado y la impulsión de los microorganismos a través del reactor, asegurando también un flujo con la turbulencia necesaria para que todas las microalgas reciban luz solar a lo largo de los canales. A continuación de las palas, en el foso, se realiza la inyección de dióxido de carbono y aire, para el control de pH y OD, utilizando las medidas tomadas por el sensor al final del canal. Dicho punto es el más crítico y más difícil de controlar debido a su distancia al foso en donde se realiza la inyección de gases, teniendo en cuenta que el sentido de circulación del cultivo es el indicado en el diagrama mediante las flechas discontinuas. Además, para el estudio previo del algoritmo diseñado, se ha hecho uso de un simulador basado en primeros principios (Nordio et al., 2024).



Figura 1: Esquema del reactor *raceway*

El pH es controlado mediante la inyección de CO₂ en el foso, la cual produce una disminución del pH. Por otro lado, el sistema presenta dos fuertes perturbaciones: la radiación solar, que permite la actividad fotosintética de los microorganismos y, por tanto, un aumento del pH; y la dilución. La dilución es la incorporación de medio acuoso al reactor para mantenerlo siempre en torno al nivel óptimo, el cual se encuentra en 15 cm (González-Hernández et al., 2022). Dicha práctica puede ser debida al cosechado (extracción de cultivo para su post-procesado y la obtención del producto final) o debido a la evaporación de agua por las condiciones ambientales. Además, el medio que se incorpora al reactor puede ser agua limpia con fertilizantes químicos que incorporen los nutrientes necesarios, o agua residual, que incorpora de manera natural los nutrientes necesarios para el crecimiento de las microalgas. En función de la composición, el medio incorporado puede

tener un pH distinto al del reactor, provocando generalmente una disminución en este.

En Caparroz et al. (2024) se ha demostrado que la dinámica del pH puede modelarse mediante un modelo de primer orden con retardo cuando se inyecta dióxido de carbono ($CO_2 > 0$) y mediante un sistema autónomo en ausencia de CO_2 ($CO_2 = 0$). De este modo, el modelo completo de pH puede describirse del siguiente modo,

$$pH(t) = \begin{cases} \tau \cdot \frac{dpH(t)}{dt} + pH(t) = k \cdot CO_2(t - t_r), & CO_2 > 0, \\ \frac{dpH(t)}{dt} = \alpha \cdot pH(t), & CO_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

donde la constante de tiempo (τ) y la ganancia estática (k) dependen de la radiación solar y el nivel y la temperatura del cultivo. Además, la inyección de CO_2 en el reactor presenta un efecto retardado debido al tiempo que demora una masa de cultivo en recorrer el canal, desde el foso donde se realiza dicha inyección, hasta el punto en que se encuentra el sensor que toma su medida. Este retardo viene reflejado en la ecuación (1) por el parámetro t_r , y su valor es de 5 minutos debido a la velocidad constante de las palas. Por otro lado, en ausencia de CO_2 , la radiación solar permite la producción de fotosíntesis por parte de los microorganismos, lo cual genera un aumento del pH. En dichas condiciones, el comportamiento de esta variable en torno al punto de operación puede modelarse como un sistema autónomo, en donde α representa la pendiente y depende del oxígeno disuelto en el cultivo, además de los parámetros mencionados anteriormente. Por último, la dinámica del pH puede tener una componente oscilatoria amortiguada debida a la recirculación de masas de cultivo con un mayor contenido de CO_2 (Berenguel et al., 2004). Sin embargo, desde un punto de vista de control, dicha dinámica puede ser despreciada, ya que su incorporación en el modelo solo añadiría una mayor complejidad y su control no produciría un impacto significativo en la productividad del sistema.

3. Algoritmo desarrollado

El algoritmo original del *autotuner* viene definido por el esquema mostrado en la Figura 2. En el caso concreto del problema estudiado, y es la medida de pH, u el caudal de CO_2 en L/min, y r es la referencia de pH, establecida en su valor óptimo, igual a 8. Cuando se quiere realizar el experimento para identificar los parámetros del modelo, el controlador PID es desconectado y se aplica una señal de relé a la señal de control durante un período de tiempo. Al finalizar el experimento, se realiza la identificación de un modelo y se ajustan los parámetros del controlador, volviendo a cerrar el bucle de control con el PI ajustado a la nueva dinámica del proceso.

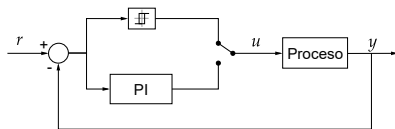


Figura 2: Esquema del *autotuner* basado en relé clásico

Dicho esquema ha sido implementado en el reactor *race-way* descrito en la Sección 2, obteniendo una excitación ade-

cuada para la obtención de un modelo alrededor del punto de operación. Sin embargo, la amplitud de la señal del relé en este enfoque se establece por prueba y error, por lo que necesita ser recalibrada a medida que cambian las condiciones climáticas o para reactores con dimensiones diferentes para conseguir una excitación suficiente para la identificación correcta de los parámetros. Esto impide su integración perfecta en los lazos de control existentes sin intervención manual periódica.

Como consecuencia de los inconvenientes del enfoque del método tradicional, en el presente trabajo se propone un *autotuner* basado en relé en el cual el controlador PI se mantiene funcionando durante el experimento y la señal de excitación es aplicada en la referencia. Así, el nuevo esquema es el mostrado en la Figura 3. Al mantener conectado el controlador PI, cuando se establece un cambio en la referencia de pH, dicho controlador es el encargado de establecer la amplitud del cambio en la señal de control para obtener una excitación adecuada.

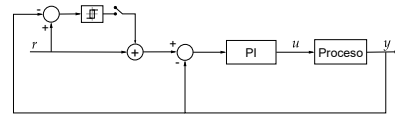


Figura 3: Esquema del *autotuner* basado en el relé aplicado en la referencia

El relé introducido es cuadrado, con la histéresis y la amplitud iguales a 0,1, y la dirección del primer cambio en la referencia depende del signo del error (la diferencia entre el pH y la referencia). Si el pH es mayor que la referencia ($y > r$), la primera referencia del experimento será $r_{rele} = r - h$. Por el contrario, si el pH es menor que la referencia ($y < r$), la referencia aumentará ($r_{rele} = r + h$).

Por otro lado, se ha dotado a los experimentos de un carácter híbrido. El algoritmo original establece que el cambio en el relé se produce cuando se alcanza la histéresis establecida. Sin embargo, en este tipo de procesos las dinámicas pueden variar mucho y alcanzar dicho valor puede tomar mucho tiempo en determinados casos. Para obtener un experimento válido en un período corto de tiempo (establecido en 45 minutos), es necesario que se den por lo menos tres cambios en la señal de excitación (Berner and Soltesz, 2017). Por lo tanto, se han incluido dos condiciones temporales adicionales que lo convierten en un relé asimétrico. Estas son:

- El relé debe permanecer en la misma posición durante al menos 5 minutos. Esto evita cambios prematuros causados por ruido de medición u oscilaciones del pH debidas a la recirculación del cultivo, asegurando que haya transcurrido, al menos, el tiempo de retardo desde el último cambio.
- El relé puede permanecer en la misma posición por un máximo de 12 minutos. Esta condición establece un límite de tiempo para el caso en que la radiación solar sea débil y el pH tarde mucho en alcanzar la histéresis.

Con la incorporación de estos parámetros adicionales se garantiza un mínimo de tres cambios de relé durante el experimento.

Los parámetros y la configuración del relé han sido decididos tras realizar múltiples pruebas, de modo que se garantice una correcta excitación del pH independientemente de las condiciones de cultivo o del clima. Además, presenta la ventaja de ser directamente aplicable a otros reactores, aunque tengan configuraciones y dimensiones diferentes. El experimento se realiza a la 1:00 p.m., hora en la que la radiación solar y la actividad fotosintética suelen estar en torno a sus valores máximos. Esto asegura que el pH suba más rápidamente cuando se reduce el caudal de CO₂, permitiendo obtener varios cambios de comportamiento en un corto período.

Este método fue validado en simulación y experimentalmente en el reactor descrito en la Sección 2 durante varios días en diferentes meses para asegurar una excitación suficiente sin alejar demasiado el sistema del punto de operación. Dada su eficacia y las ventajas que ofrece sobre el experimento clásico basado en relé, fue el método elegido para la implementación con fines de control.

3.1. Identificación del modelo

Una vez realizado el ensayo, se procede a la identificación de un modelo que represente el efecto del CO₂ sobre el pH medido al final del lazo. Tal como se explicó en la Sección 2, ante la presencia de caudal de dióxido de carbono, el pH puede modelarse como un modelo de primer orden con retardo, caracterizado por una constante de tiempo (τ), una ganancia estática (k) y el tiempo de retardo ($t_r = 300s$). Sin embargo, en Caparroz et al. (2024) se estudió la variabilidad que pueden sufrir τ y k en función de las condiciones ambientales y del cultivo, encontrando que la constante de tiempo puede tomar valores muy elevados en comparación con el tiempo de retardo, por lo que también puede resultar oportuno aproximar su comportamiento a un integrador con retardo. Como consecuencia, el modelo identificado en este trabajo es de la forma mostrada en (2),

$$G(s) = \frac{pH(s)}{CO_2(s)} = \frac{b}{s+a} \cdot e^{-t_r s}, \quad (2)$$

donde pH es el pH medido al final del canal, CO_2 es el caudal de CO₂ en L/min, s es la variable del dominio de Laplace, y b y a son los parámetros a identificar.

El proceso de identificación comienza definiendo un espacio de búsqueda de parámetros para a basado en el conocimiento previo del sistema. Para cada valor candidato de a , se simula la respuesta del sistema asumiendo una ganancia unitaria inicial. Posteriormente, se determina la ganancia real del sistema comparando la salida simulada con la salida real.

Para el modelo obtenido con cada valor candidato de a , se utiliza el error cuadrático medio (MSE) como función de coste para cuantificar el error cometido entre la salida del modelo ajustado y la salida real. Al finalizar este proceso para todo el espacio de valores de a , el modelo que resulta en el valor más bajo de la función de coste se selecciona como la mejor representación de la dinámica del sistema (Berner, 2017). La ventaja de la representación escogida para el modelo (Ecuación (2)) radica en que se permite la identificación del integrador, en caso de ser esta la representación que menor error obtiene al compararlo con los datos reales. El conjunto de valores posibles incluye desde $1,25 \cdot 10^{-4}$ hasta 0,005, además del 0.

Dichos valores han sido seleccionados gracias al conocimiento previo del sistema (Caparroz et al., 2024).

Una vez identificado el sistema, se debe considerar si es conveniente ajustar los parámetros del controlador o no.

3.2. Análisis de la validez de los datos

Una consideración importante a tener en cuenta es que durante el experimento de identificación del modelo no puede haber presencia de perturbaciones, puesto que esto puede derivar en una incorrecta estimación de los parámetros y por tanto, una representación poco adecuada del sistema no apta para la resintonización de los parámetros del controlador. Tal como se ha comentado en la Sección 2, las perturbaciones que más efecto presentan sobre el pH son la dilución del cultivo y la radiación. La primera se trata de una variable manipulable, por lo que, durante el desarrollo del experimento, esta es anulada sin presentar consecuencias negativas sobre la productividad. Sin embargo, la radiación solar no puede ser modificada, y el paso de nubes durante el experimento podría provocar grandes cambios en la dinámica del pH, obteniendo por tanto una identificación incorrecta de los parámetros. Es por eso que, transcurrido el período correspondiente al ensayo de relé, se realiza un análisis en el que se define si hubo presencia considerable de nubes. En los algoritmos originales, es usualmente un operario el que define si el experimento es adecuado para la resintonización del controlador. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es obtener un algoritmo lo más automático posible y que requiera intervención mínima, dependiendo en la menor medida posible del criterio humano.

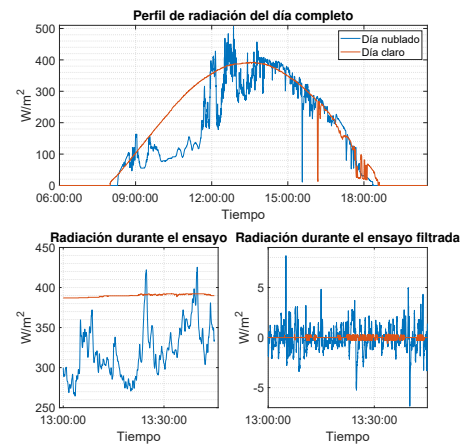


Figura 4: Análisis de presencia de perturbaciones en la radiación

Para ello, se propone un método de detección de días válidos mediante herramientas de clasificación. En la gráfica superior de la Figura 4 se muestran dos perfiles de radiación, uno con una gran presencia de nubes (azul) y otro característico de un día claro, con la presencia de escasas nubes en las últimas horas del día (naranja). En la gráfica inferior izquierda se puede observar el perfil de la radiación para ambos días durante el ensayo de identificación. Por último, en la gráfica inferior derecha puede verse la señal durante el intervalo de interés tras aplicarle un filtro paso alto, de modo que se elimina la tendencia de la radiación y se conserva el ruido de alta

frecuencia correspondiente al paso de las nubes. Para clasificar automáticamente el intervalo como “claro” o “nublado” se ha entrenado un árbol de decisión utilizando el *Classification Learner Toolbox* de Matlab, el cual es alimentado con dos predictores: la diferencia entre el máximo y el mínimo de la radiación (sin filtrar) y la integral de la señal filtrada.

Por otro lado, se calcula la bondad de ajuste del modelo, el cual debe superar el 70 % para tomar los parámetros como válidos. Si esta condición se cumple y no se han detectado nubes durante el experimento acorde al método de clasificación anteriormente descrito, puede procederse a ajustar los parámetros del controlador.

3.3. Ajuste del controlador

El bucle de control diseñado es el mostrado en la Figura 5, donde se observa el controlador PI, que incluye estructura *antiwindup* para hacer frente a la saturación de la acción integral y un *feedforward* estático para compensar en cierta medida las perturbaciones procedentes de la radiación solar (FF) (Guzmán and Hägglund, 2024), que también es ajustado cada día teniendo en cuenta la ganancia del modelo identificado.

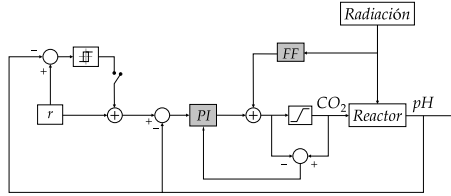


Figura 5: Esquema de control

El controlador PI presenta la forma mostrada en (3),

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right), \quad (3)$$

y ha sido sintonizado utilizando el método SIMC (Skogestad and Grimholt, 2012), cuyas fórmulas para la ganancia proporcional (K_p) y la constante de tiempo integral (T_i) varían en función del tipo de modelo identificado. En caso de tratarse de un modelo de primer orden, los parámetros del controlador se calculan según las siguientes expresiones,

$$K_p = \frac{1}{k} \cdot \frac{\tau + \frac{t_r}{3}}{\tau_{bc} + t_r}, \quad T_i = \min \left\{ \tau + \frac{t_r}{3}, 4 \cdot (\tau_{bc} + t_r) \right\}, \quad (4)$$

donde $k = b/a$ y $\tau = 1/a$. Por otro lado, si se trata de un integrador se calculan según las siguientes expresiones:

$$K_p = \frac{1}{b} \cdot \frac{1}{\tau_{bc} + t_r}, \quad T_i = 4 \cdot (\tau_{bc} + t_r). \quad (5)$$

En ambos casos, τ_{bc} es la constante de tiempo de bucle cerrado y es definida igual al tiempo de retardo, siguiendo las recomendaciones brindadas en (Skogestad and Grimholt, 2012). Además, la constante de tiempo de *tracking* correspondiente al *antiwindup* se establece igual al tiempo integral.

La ganancia del *feedforward* (K_{FF}) se determina como la relación entre la ganancia del pH con respecto a la radiación (K_r) y la ganancia del pH respecto al caudal de CO_2 ($k = b/a$) obtenida en el proceso de identificación. Por tanto, resulta

$K_{FF} = K_r/k$. Como ganancia del modelo de perturbación se toma un valor nominal fijo y la ganancia del *feedforward* se actualiza cada día tras la validación del nuevo modelo del proceso.

4. Resultados

El algoritmo de control diseñado fue implementado en el simulador durante tres días, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 6 y ha sido comparado con la misma estructura de control mostrada en la Figura 5 pero cuyos parámetros se mantienen fijos. En la gráfica superior puede observarse el resultado de control de pH por ambas estrategias y la referencia, establecida en 8. En la gráfica central se observa el caudal de CO_2 inyectado por cada estrategia y, por último, la gráfica inferior muestra las dos perturbaciones más influyentes: la radiación y la dilución. Cuando el controlador comienza a actuar el primer día, ambos esquemas presentan los mismos parámetros. Posteriormente, después de cada ensayo de identificación, el controlador adaptativo es ajustado.

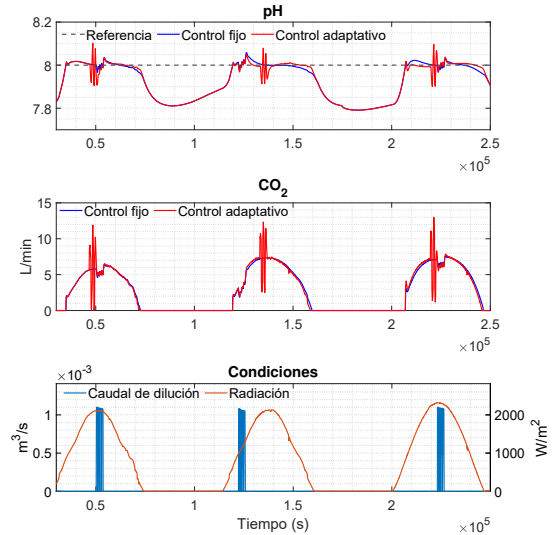


Figura 6: Implementación del autotuner en simulación

Puede observarse que el esquema desarrollado obtiene una mejor regulación del pH, manteniéndolo más cercano al valor óptimo y rechazando las perturbaciones con una mayor velocidad. Además, puede observarse que, gracias a aplicar la señal de relé en la referencia y mantener el PI activo, es el propio controlador el que determina el cambio necesario en el caudal de CO_2 . Resulta evidente que si se utiliza la técnica del relé original, una misma amplitud no provocará la misma excitación sobre el pH, ya que la amplitud de los cambios en el CO_2 en los tres días varía enormemente.

Por último, en la Tabla 1 puede observarse cómo varían los parámetros del modelo y el controlador tras cada experimento, así como los valores iniciales de este, que coinciden con los utilizados por la estrategia sin adaptación. Además, puede observarse que se obtiene un muy buen ajuste de los modelos. Cabe destacar que todos los días presentan perfiles claros de radiación. En caso de detectar el paso de nubes, el sistema adaptativo descarta el modelo obtenido, conservando los parámetros del controlador previos al experimento.

Además de ser gráficamente visible la mejora aportada por la adaptación de los parámetros, la técnica propuesta consigue una mejora del 17 % en el IAE (Integral Absoluta del Error) y del 30 % en el ITAE (Integral del Tiempo por el Error Absoluto), sin aumentar el consumo total de CO₂.

Día	k	τ	FIT	K_p	T_i	K_{FF}
-				-30.38	2350	0.0029
1	-0.075	1111	83.2 %	-26.97	1211	0.0031
2	-0.052	833	92.2 %	-29.92	933	0.0045
3	-0.051	833	90.6 %	-30.7	933	0.0044

Tabla 1: Parámetros del modelo y del controlador para cada día

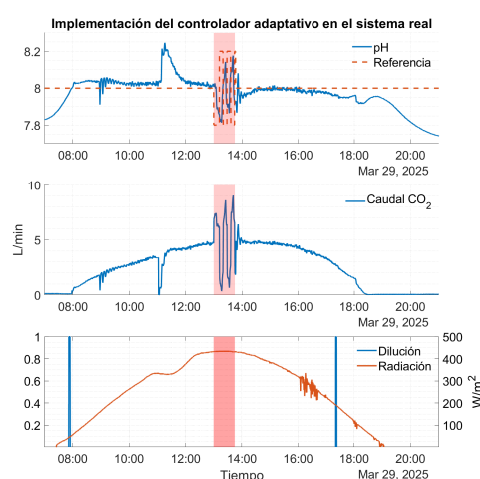


Figura 7: Resultados en el sistema real

Tras comprobar que la técnica propuesta supone una mejora frente a técnicas clásicas, ha sido implementada en las instalaciones reales, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 7. Puede observarse que el controlador es capaz de mantener el pH en torno al punto de operación y que su desempeño es mejorado tras el ajuste de los parámetros del controlador, una vez realizado el experimento de identificación. Cabe destacar que las oscilaciones observadas en el pH sobre las 09:00 hs son debidas al comienzo de la inyección de aire en el foso, que provoca el ascenso de microorganismos que se encontraban decantados. Por otro lado, alrededor de las 11:00 hs, se produce un cambio brusco en el valor del pH, debido a la limpieza rutinaria del sensor, ante el cual el controlador es capaz de corregir su comportamiento rápidamente. Antes de realizar el ensayo, los valores de los parámetros del controlador eran $K_p = -8,93$, $T_i = 2400$ y $K_{FF} = 0,0021$. Tras el ensayo, gracias a los nuevos parámetros del controlador ($K_p = -10,4$, $T_i = 2367$ y $K_{FF} = 0,0047$) se consigue mantener el pH en valores más cercanos a 8 y consigue rechazar el efecto que causa la presencia de nubes, no notándose ninguna perturbación sobre el pH medido.

5. Conclusiones

Puede comprobarse que las modificaciones propuestas al algoritmo brindan ventajas significativas que permiten la integración de sintonizadores automáticos en el proceso de producción, eliminando totalmente la necesidad de la intervención de un operario. Además, los resultados en simulación

prueban que, aún siendo un algoritmo muy sencillo, la adaptación de los parámetros permite obtener una mejor regulación del pH y un mejor rechazo a las perturbaciones. Los resultados en el sistema real prueban que es fácilmente trasladable a las instalaciones. Este trabajo puede ser mejorado realizando una campaña extensa de ensayos en el reactor y comparando el desempeño del controlador propuesto con aquel de un controlador fijo a lo largo de todo el año, de modo que se observen las variaciones ambientales y en el cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención no. 101060991 REALM y por el proyecto no. PID2023-150739OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia Español. Malena Caparroz es beneficiaria de un contrato FPU financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU23/02235).

Referencias

- Åström, K. J., Hägglund, T., 1984. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica* 20 (5), 645–651, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(84\)90014-1](https://doi.org/10.1016/0005-1098(84)90014-1).
- Berenguel, M., Rodríguez, F., Ación, F. G., García, J. L., 2004. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control* 14 (4), 377–387, <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2003.07.001>.
- Berner, J., 2017. Automatic controller tuning using relay-based model identification Doctoral Thesis (compilation), Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University.
- Berner, J., Soltesz, K., 2017. Short and robust experiments in relay autotuners. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247696>.
- Caparroz, M., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Ación, F. G., 2024. A novel data-driven model for prediction and adaptive control of pH in raceway reactor for microalgae cultivation. *New Biotechnology* 82, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2024.04.001>.
- Caparroz, M., Guzmán, J. L., Gil, J. D., Berenguel, M., Ación, F. G., 2025. A hybrid MRAC-PI approach to regulate pH in raceway reactors for microalgae production. *Control Engineering Practice* 156, 106191, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.106191>.
- González-Hernández, J., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J. L., Ación, F. G., Visioli, A., 2022. Temperature optimization in microalgae raceway reactors by depth regulation. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 19(2), 164–173, <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16586>.
- Guzmán, J. L., Hägglund, T., 2024. Feedforward Control: Analysis, Design, Tuning rules, and Implementation. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Nordio, R., Rodríguez-Miranda, E., Casaghi, F., Sánchez-Zurano, A., Guzmán, J. L., Ación, G., 2024. Abaco-2: a comprehensive model for microalgae-bacteria consortia validated outdoor at pilot-scale. *Water Research* 248, 120837, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120837>.
- Pataro, I. M. L., Gil, J. D., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Lemos, J. M., 2023. A learning-based model predictive strategy for pH control in raceway photobioreactors with freshwater and wastewater cultivation media. *Control Engineering Practice* 138, 105619, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105619>.
- Razzak, S. A., Bahar, K., Islam, K. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. Z., Hossain, M. M., 2024. Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering* 5 (4), 418–439, <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>.
- Skogestad, S., Grimholt, C., 2012. The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning. In: Vilanova, R., Visioli, A. (eds) *PID Control in the Third Millennium*. Advances in Industrial Control. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_5.
- Yu, B. S., Pyo, S., Lee, J., Han, K., 2024. Microalgae: a multifaceted catalyst for sustainable solutions in renewable energy, food security, and environmental management. *Microbial Cell Factories* 23 (1), 308, <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02588-7>.